

Vaihtoehtoja kestävämpään turkiseläinten lannan hyödyntämiseen

**Suvi Lehtoranta, Annika Johansson, Riikka Malila, Katri Rankinen,
Juha Grönroos, Sari Luostarinen, Kaarle Kaistila**



Vaihtoehtoja kestävämpään turkiseläinten lannan hyödyntämiseen

**Suvi Lehtoranta, Annika Johansson, Riikka Malila, Katri Rankinen,
Juha Grönroos, Sari Luostarinen, Kaarle Kaistila**



Suomen ympäristökeskuksen raportteja 35 | 2020
Suomen ympäristökeskus
Kulutuksen ja tuotannon keskus

Kirjoittajat: Suvi Lehtoranta ¹⁾, Annika Johansson ¹⁾, Riikka Malila ¹⁾, Katri Rankinen ¹⁾,
Juha Grönroos ¹⁾, Sari Luostarinen ²⁾, Kaarle Kaistila ³⁾

¹⁾ Suomen ympäristökeskus

²⁾ Luonnonvarakeskus

³⁾ Tuuliruusu Yritys- ja ympäristöpalvelut

Vastaava erikoistoimittaja: Ari Nissinen

Rahoittaja: Manner-Suomen maaseudun kehittämisohjelma, FIFUR, Ecoconcept Earth Ab

Julkaisija ja kustantaja: Suomen ympäristökeskus (SYKE)

Latokartanonkaari 11, 00790 Helsinki, puh. 0295 251 000, syke.fi

Taitto: Suvi Lehtoranta

Kannen kuva: Suvi Lehtoranta

Julkaisu on saatavana veloitusetta internetistä: www.syke.fi/julkaisut | helda.helsinki.fi/syke
sekä ostettavissa painettuna SYKEN verkkokaupasta: syke.omapumu.com

ISBN 978-952-11-5203-0 (PDF)

ISBN 978-952-11-5202-3 (nid.)

ISSN 1796-1726 (verkkoj.)

ISSN 1796-1718 (pain.)

Julkaisuvuosi: 2020

Tiivistelmä

Vaihtoehtoja kestävämpään turkiseläinten lannan hyödyntämiseen

Turkiseläinten lanta sisältää runsaasti arvokasta fosforia ja typpeä, joiden kierrättämiseen kiinnitetään enenevästi huomiota. Lannan fosforin ja typen suhde on kuitenkin kasvien kannalta epäsuotuisa ja turkistuotanto on keskittynyt alueille, joilla on runsaasti muuta kotieläintuotantoa ja monin paikoin korkea peltomaan fosforipitoisuus. Lantafosforista on täten ylitarjontaa.

Turkiseläinten lannan nykyinen käsittelyketju ei mahdollista lantaravinteiden kuljettamista niitä tarvitseville alueille eikä se siten mahdollista tehokasta ravinteiden kierrätystä. Käytetyt käsittelymenetelmät on suunniteltu mm. työtarpeen vähentämiseksi ja lannan hygieenisyyden varmistamiseksi, mutta ne aiheuttavat voimakasta typenhävikkiä ja lisäävät riskiä alueen vesistöjen rehevöitymiseen. Tilakohtaisilla toimilla, kuten tihennetyllä lannan poistolla ja lannan katetulla varastoinnilla, voitaisiin vähentää typpitappioita ja siten parantaa lannan ravinnearvoa, mutta alueellisen fosforiylijäämän purkamiseen toimenpiteet eivät tarjoa ratkaisua.

Prosessoimalla lanta siten, että sen sisältämä typpi ja fosfori saadaan erilleen, voidaan lantaperäisten ravinteiden lannoitekäyttöä tehostaa. Fosforipitoinen jae voidaan kuljettaa pois ylitarjonnan alueilta ja typpipitoinen jae hyödyntää lähialueilla, missä se korvaa tehokkaasti mineraalityypen käyttöä. Samalla vähennetään riskiä vesistöjen rehevöitymiselle, kun leville suoraan käyttökelpoisen liukoisen fosforin kuormitus alkaa hitaasti laskea.

Tässä tutkimuksessa selvitettiin turkiseläinten lannan nykyisen käsittelyketjun käytännöt, joita verrattiin vaihtoehtoihin käsittelyketjuihin. Lannan suoran lannoitekäytön tai kompostoinnin ja lannoitekäytön elinkaariset ympäristövaikutukset arvioitiin ensin nykytilassa. Niitä verrattiin lannan biokaasutukseen ja mädätteen jatkojalostukseen, pyrolyysiin ja näiden yhdistelmään. Biokaasuprosessilla voidaan tuottaa uusiutuvaa energiaa ja sen jälkeen typpi ja fosfori on mahdollista erottaa toistaan kuljettaviksi lannoitevalmisteiksi. Pyrolyysi puolestaan väkevoi fosforin hiilijakeeseen ja typpeäkin voidaan ottaa talteen esikuivauksen yhteydessä.

Tarkastellut vaihtoehtoiset turkiseläinten lannan prosessointimenetelmät voivat pienentää lannankäsittelyn elinkaarisia ympäristövaikutuksia, mikäli koko ketju hallitaan hyvin kaikissa elinkaaren vaiheissa ja päästöt minimoidaan ja samalla alueellista fosforiylijäämää puretaan. Ilmastohyötyjen toteutuminen edellyttää, että lanta prosessoidaan ilman pitkää esivarastointia ja biokaasutuotannon metaanipäästöt minimoidaan. Pyrolyysin ympäristöhyötyjä ei voi yleistää vaan ne tulee arvioida tapauskohtaisesti, sillä prosessin operoinnissa tehtävät valinnat vaikuttavat saataviin lopputuotteisiin.

Tarkastellut lannan prosessointimenetelmät vähentävät ammoniakkipäästöjä nykytilaan verrattuna, koska muodostuvien lannoitevalmisteiden peltokäytön päästöt pienenevät. Biokaasutuotannon yhteydessä myös lannan liukoinen typpi on tehokkaammin hyödynnettävissä kuin nykytilassa: tarkastelun mukaan liukoista typpeä päätyisi kasvien käyttöön yli neljä kertaa enemmän kuin nykytilassa lantaa kompostoitaessa.

Lannan prosessointi siirtää lannan nopeasti hajoavaa hiiltä kaasumaisiin lopputuotteisiin pysyvämman hiilen päätyessä lannoitevalmisteisiin. Prosessien lopputuotteiden hiilen pysyvyydessä on eroja, siten että pyrolyysissa syntyvät hiilijakeet ovat hitaimmin hajoavia. Lannan ja siitä prosessoitujen lannoitevalmisteiden avulla voidaan ylläpitää peltomaan hiilipitoisuutta, tai jopa lisätä sitä.

Asiasanat: Turkiseläimet, lanta, biokaasu, pyrolyysi, ravinteiden kierrätys, elinkaariarviointi

Sammandrag

Alternativ för ett mer hållbart utnyttjande av pälsdjursgödsel

Pälsdjurgödsel är rik på värdefull fosfor och kväve och ökad uppmärksamhet ägnas åt näringsåtervinning. Förhållandet mellan fosfor och kväve i gödsel är dock ogynnsamt för växter och många av fälten i närheten har redan ett högt fosforinnehåll på grund av geografiskt koncentrerad djurhållning. Det finns således ett regionalt överutbud av gödsel fosfor.

De nuvarande metoderna för behandling av pälsdjursgödsel stöder inte transporten av gödselnäringsämnen till områden i behov av dessa och därmed effektiv återvinning av näringsämnen. Nuvarande metoder är utformade t.ex. för att minska arbetsbelastningen och säkerställa gödselhygien, men de orsakar allvarliga kväveförluster och ökar risken för näringsläckage och eutrofiering. Jordbruksspecifika åtgärder, såsom mer frekvent gödselavlägsning och täckt gödsellagring, kan minska kväveförlusterna och därmed förbättra gödselns näringsvärde, men dessa åtgärder ger inte en lösning för att hantera regionalt överskott av fosfor.

Genom att behandla gödseln på ett sådant sätt att dess innehåll av kväve och fosfor separeras kan användningen av näringsämnen ur gödsel förbättras. Den fosforinnehållande fraktionen kan transporteras bort från områden med överskott och den kväveinnehållande fraktionen kan användas i närheten för att ersätta användningen av mineralkväve. Samtidigt minskar risken för eutrofiering av vattendrag när belastningen av lösligt fosfor, som är direkt användbart för alger, långsamt börjar minska.

Denna studie bedömde och jämförde de nuvarande metoderna för hantering av pälsdjurgödsel med alternativa metoder. Livscykelbedömningen av direkt gödselapplicering eller kompostering och gödnings tillämpning utvärderades först med nuvarande metoder. Dessa jämfördes med gödsel biogasifiering och vidare bearbetning av rötrest, pyrolys och en kombination av dessa. Biogasprocessen kan användas för att producera förnybar energi och vidare bearbetning för att separera kväve och fosfor till transportabla gödselmedel. Pyrolys koncentrerar i sin tur fosforet i kolfraktionen och kväve kan utvinas under förtorkning.

De alternativa hanteringsmetoderna för pälsdjurgödsel kan minska miljöpåverkan av gödselhantering om hela bearbetningskedjan hanteras väl i alla stadier av livscykeln, utsläppen minimeras och fosfor transporteras till områden med fosforunderskott. För att förverkliga klimatfördelarna krävs att gödsel bearbetas utan lång förlagring och att metanutsläpp från biogasproduktion minimeras. De miljömässiga fördelarna med pyrolys kan inte generaliseras utan måste bedömas från fall till fall, eftersom valen som gjorts vid processen påverkar de slutliga produkterna som erhålls.

De granskade metoderna för gödselbearbetning minskar ammoniakutsläppen jämfört med nuvarande praxis, eftersom utsläppen minskar med tillämpning av gödningspreparaten som uppstod. I samband med biogasproduktion kan gödselns lösliga kväve också användas mer effektivt än i nuvarande tillstånd. Enligt studien finns det mer än fyra gånger mer lösligt kväve tillgängligt för växter jämfört med nuvarande praxis med komposteringsgödsel.

Med hjälp av gödselbearbetning överförs det snabbt sönderfallande kolet från gödsel till gasformiga slutprodukter, medan mer stabilt kol hamnar i gödselmedlet. De alternativa processerna producerar slutprodukter med skillnader i kolstabilitet, varav de kolfraktioner som bildas i pyrolys är de långsammaste att sönderdelas. Gödsel och gödselbaserade gödselmedel kan användas för att upprätthålla eller till och med öka kolinnehållet i åkerjorden.

Nyckelord: Pälsdjurgödsel, biogas, pyrolys, återvinning av näringsämnen, livscykelbedömning

Abstract

Alternatives for more sustainable utilization of fur manure

Fur animal manure is rich in valuable phosphorus and nitrogen and increasing attention is being placed on nutrient recovery. However, the ratio of phosphorus to nitrogen in manure is unfavorable for plants and many of the fields in the vicinity have a high phosphorous content due to geographically concentrated animal farming. There is a regional oversupply of manure phosphorus.

The current fur animal manure management practices do not support the transportation of manure nutrients to areas in need and thus efficient recovery of nutrients. Current practices are designed e.g. to reduce the workload and to ensure the hygiene of the manure, but they cause severe nitrogen losses and increase a risk of nutrient leaching and eutrophication. Farm-specific measures, such as more frequent manure removal and covered manure storage, could reduce nitrogen losses and thus improve the nutrient value of manure, but these measures do not provide a solution to address regional surplus of phosphorus.

By processing manure in such a way that the nitrogen and phosphorous it contains are separated, the use of manure derived nutrients can be improved. The phosphorus-containing fraction can be transported away from areas of oversupply and the nitrogen-containing fraction can be utilized in the vicinity to replace the use of mineral nitrogen. At the same time, the risk of eutrophication of watercourses decreases, when the load of soluble phosphorus directly usable to algae slowly begins to decrease.

This study assessed and compared the current fur animal manure management practices to alternative ones. The life cycle assessment of direct manure application or composting and fertilizer application were first assessed in the current state. These were compared with manure biogasification and further processing, pyrolysis, and a combination of these. The biogas process can be used to produce renewable energy and further processing to separate nitrogen and phosphorus into transportable fertilizers. Pyrolysis, in turn, concentrates the phosphorus in the carbon fraction and nitrogen can also be recovered during pre-drying.

The alternative management practices for fur animal manure can reduce the environmental impacts of manure management if the entire processing chain is well managed at all stages of the life cycle and emissions are minimized and phosphorous transported to phosphorous deficit areas. The realization of climate benefits requires that manure is processed without long pre-storage and that methane emissions from biogas production are minimized. The environmental benefits of pyrolysis cannot be generalized but must be assessed on a case-by-case basis, as the choices made in the operation of the process affect the final products obtained.

The alternative manure processing methods reduce ammonia emissions compared to the current state, because the emissions from the field application of the fertilizers decrease. In connection with biogas production, the soluble nitrogen of the manure can also be used more efficiently than in the current state: according to the study, there are more than four times as much soluble nitrogen available to plants than from composting manure in the current state.

Manure processing transfers the rapidly decomposing carbon of manure to gaseous end products, with more persistent carbon ending up in fertilizers. The alternative processes produce end products with differences in the carbon stability, of which the carbon fractions formed in pyrolysis are the slowest to decompose. Manure and manure-based fertilizers can be used to maintain, or even increase, the carbon content of the field.

Keywords: Fur animal manure, biogas, pyrolysis, nutrient recycling, life cycle assessment

Esipuhe

Tehoa turkislannan hyödyntämiseen (TURKISTEHO) -hankkeessa (2016-2019) selvitettiin vaihtoehtoisia toimintamalleja turkiseläinten lannan käsittelyyn. Hankkeen koordinaattorina toimi Suomen Turkiseläinten Kasvattajain Liitto ry (FIFUR) partnereinaan Luonnonvarakeskus (Luke) ja Suomen ympäristökeskus (SYKE). Hankkeen päärahoittajana toimi Manner-Suomen maaseudun kehittämisohjelma. Kiitämme rahoittajia ja ohjausryhmää asiantuntija-avusta ja aktiivisesta osallistumisesta hankkeen toteuttamiseen.

Tässä raportissa kuvataan turkiseläinten kasvatuksen ja lannankäsittelyn nykytilanne ja vaihtoehtoiset lannan hyödyntämismenetelmät, ja esitetään näille tehtyjen elinkaaristen ympäristövaikutusten arvioinnin tulokset. Hankkeesta tuotettiin myös kaksi muuta osaraporttia Luken julkaisusarjoissa, joihin tässä raportissa viitataan (Tampio ym. 2020, Sarvi ym. 2020). Kiitämme hankeyhteistyöstä Luken tutkijoita Elina Tampio, Johanna Laakso, Minna Sarvi, Saija Rasi, Kimmo Rasa, Tapio Salo, Erika Winqvist ja Erkki Joki-Tokola. Lisäksi lannan hiilivarastovaikutusten arvioinnin asiantuntija-avusta haluamme kiittää SYKEN Tuomas Mattilaa ja Sampo Soimakalliota.

Helsingissä heinäkuussa 2020

Raportin kirjoittajat

Sisällys

Tiivistelmä.....	3
Sammandrag.....	4
Abstract.....	5
Esipuhe.....	7
1 Turkiseläinten lannan hyödyntämisen nykytila Suomessa.....	11
1.1 Turkistuotanto Suomessa.....	11
1.2 Turkiseläinten lannan määrä ja ominaisuudet.....	12
1.3 Turkiseläinten kasvatusta ja lannankäsittely.....	12
1.4 Turkiseläinten lannan hyödyntämisen haasteet.....	15
2 Lannan prosessoinnin mahdollisuudet.....	18
2.1 Vaihtoehdot turkiseläinten lannan prosessoinnille.....	19
2.1.1 Lannan biokaasutus.....	19
2.1.2 Lannan pyrolysointi.....	20
3 Lantaketjun tehostaminen tilakohtaisilla toimenpiteillä.....	22
3.1 Ruokinnan täsmentäminen.....	22
3.2 Kuivikkeeseen lisääminen.....	22
3.3 Lannanpoistotiheys.....	23
3.4 Lannan varastointi.....	24
3.5 Lannan levitys.....	24
3.6 Turkiseläinten kasvatusta hallissa.....	25
3.7 Tilan vesien hallinta ja -talteenotto.....	25
3.8 Yhteenveto.....	25
4 Lannankäsittelyn elinkaaristen ympäristövaikutusten arviointi.....	27
4.1 Elinkaariarviointi menetelmänä.....	27
4.2 Turkiseläinten lannan käsittelyketjujen ympäristövaikutusten arviointi.....	27
4.3 Tarkasteltujen lannankäsittelyketjujen kuvaukset.....	28
4.3.1 Nykytila 1 – Ei prosessointia.....	28
4.3.2 Nykytila 2 – Lannan kompostointi.....	29
4.3.3 Skenaario 1 – Lannan biokaasutus ja mädätteen jatkojalostus.....	29
4.3.4 Skenaario 2 – Lannan pyrolyysi.....	30
4.3.5 Skenaario 3 – Lannan biokaasutus (BK) ja kuivajakeen pyrolyysi.....	30
4.4 Laskentatiedot.....	31
4.4.1 Tarhaus varjotaloissa.....	31
4.4.2 Varastointi.....	32
4.4.3 Levitys.....	33
4.4.4 Lannan kaasumaiset päästöt.....	33
4.4.5 Kuljetukset.....	34
4.4.6 Kompostointi.....	34
4.4.7 Biokaasutus.....	35
4.4.8 Pyrolyysi.....	37
4.4.9 Biokaasutus ja pyrolyysi.....	39

4.4.10 Hyvitetyt päästöt	40
4.4.11 Rehevöityminen	41
4.4.12 Laskennan epävarmuudet ja herkkyystarkastelut.....	42
5 Tulokset ja tulosten tarkastelu	44
5.1 Ilmastonmuutos.....	44
5.1.1 Varastointiajan vaikutus	45
5.1.2 Kuljetusmatkan vaikutus	46
5.1.3 Ylijäämälämmön hyödyntäminen	47
5.1.4 Hiilen hajoamisnopeuden vaikutus	48
5.2 Ammoniakkipäästöt ja typen hyödyntäminen	49
5.3 Vesistöjen rehevöityminen	51
6 Yhteenveto ja johtopäätökset	52
Sanasto.....	54
Lähteet	55

1 Turkiseläinten lannan hyödyntämisen nykytila Suomessa

Turkiseläinten lanta sisältää runsaasti fosforia ja typpeä, ja vaikka lannan määrä on vähäinen, se sisältää noin 16 % kaikesta lantafosforista Suomessa. Turkistiloilla on harvoin omaa peltoa, joten lanta hyödynnetään pääasiassa lähialueen kasvintuotantotiloilla. Turkistuotanto on kuitenkin keskittynyt Pohjanmaan maakuntiin, missä on runsaasti myös muuta kotieläintuotantoa ja ylitarjontaa lantafosforista. Tehokkaampia menetelmiä turkiseläinten lannan hyödyntämiseen tarvitaan.



Kuva: Annika Johansson/SYKE

1.1 Turkistuotanto Suomessa

Turkistarhaus on voimakkaasti alueellisesti keskittynyttä elinkeinotoimintaa. Vuonna 2018 Suomen turkiseläinten kasvattajain liiton jäsentiloja oli 763, ja ne toimivat noin 900 kasvatuspaikalla. Suurin osa kasvatuspaikoista sijaitsi Pohjanmaan neljässä maakunnassa (Pohjanmaa, Etelä-, Keski- ja Pohjois-Pohjanmaa) (FIFUR 2019). Turkistilojen määrä on vuosien myötä laskenut ja tuotanto on keskittynyt suuremmille tiloille. Sivutoiminen turkiseläinten kasvatus on vähäistä ja pääasiassa kasvattajat ovat päätoimisia.

Vuonna 2018 tiloilla tuotettiin noin 2,5 miljoonaa ketunnahkaa ja 1,9 miljoonaa minkinnahkaa. Suomi on maailman suurimpia ketunnahkojen tuottajia. Eläinten kasvatus, lopetus, nahkonta ja nahkojen huutokauppa tapahtuu Suomessa, mutta nahkojen muokkaaminen ja turkispukineiden valmistus Kiinassa tai vähäisemmässä määrin muualla Euroopassa. Turkisten viennin arvo oli vuonna 2018 317 miljoonaa euroa ja elinkeinolla on suuria alueellisia talousvaikutuksia. (FIFUR 2019)

1.2 Turkiseläinten lannan määrä ja ominaisuudet

Vuonna 2016 turkiseläinten lantaa muodostui pääasiallisen tarhaustavan eli varjotalojen alta kerättynä noin 216 000 tonnia (eläinmäärät: STKL 2017; lantatiedot: Suomen normilanta –järjestelmä, Luostarinen ym. 2017a, b.¹). Lannan varastoinnin aikana tapahtuvat hävikit ja hajoaminen huomioiden lantaa muodostui 146 700 tonnia (Taulukot 1 ja 2).

Taulukko 1. Kettujen ja suomensupien lannan määrä ja ominaisuudet Suomessa vuonna 2016 Suomen normilanta –järjestelmällä (Luostarinen ym. 2017a, b) laskettuna.

Ominaisuus	Varjotalon alta	Varastoinnin jälkeen
Määrä (t/v)	173 150	117 700
Kuiva-aine, TS (%)	32,5	40,7
Orgaaninen aine, VS (%)	25,2	29,9
Kokonaistyyppi, Ntot (kg/t)	28,5	24,7
Liukoinen typpi, Nsol (kg/t)	19,6	11,5
Kokonaisfosfori, Ptot (kg/t)	13,6	20,1
Kokonaiskalium, K (kg/t)	0,25	0,37

Taulukko 2. Minkkien lannan määrä ja ominaisuudet Suomessa vuonna 2016 Suomen normilanta –järjestelmällä (Luostarinen ym. 2017a, b) laskettuna.

Ominaisuus	Varjotalon alta	Varastoinnin jälkeen
Määrä (t/v)	42 700	29 000
Kuiva-aine, TS (%)	32,2	40,2
Orgaaninen aine, VS (%)	25,3	30,1
Kokonaistyyppi, Ntot (kg/t)	34,1	28,2
Liukoinen typpi, Nsol (kg/t)	25,0	14,7
Kokonaisfosfori, Ptot (kg/t)	12,3	18,1
Kokonaiskalium, K (kg/t)	0,39	0,57

Pääosa turkiseläinten lannasta muodostuu pentujen kasvatuksessa. Siitoseläimien osuus kettujen ja suomensupien lantamäärästä on noin viidennes ja minkeillä noin kolmannes kaikesta muodostuvasta lannasta. Kaikkiaan turkiseläinten lannan määrä on vain prosentin luokkaa kaikesta Suomessa vuosittain muodostuvasta lannasta. Sen sijaan lantafosforista turkiseläinten lannan osuus on merkittävä, eli noin 16 % kaikesta Suomen lantafosforista.

Turkiseläinten lannan ravinnepitoisuus on muihin lantoihin nähden varsin korkea, koska turkiseläinten rehu sisältää runsaasti ravinnepitoisuudeltaan väkeviä teuras- ja kalamassoja. Ruokintamäärä ja rehun energiasisältö ovat suhteellisen pieniä siitoseläinten odottaessa lisääntymisvaihetta, kun taas kantavien ja imettävien naaraiden sekä kasvavien pentujen ruokintaan kiinnitetään erityistä huomiota hyvän pentutuloksen ja laadukkaan turkiksen varmistamiseksi. Turkiseläinten ruokinta onkin optimoitu edullisen rehun ja laadukkaan turkiksen tuotannon kannalta. Fosforia eläimet saavat enemmän kuin tarvitsevat kasvuunsa, mistä kertoo lantaan erittyvän fosforin korkea määrä (Luostarinen ym. 2017b). Myös typen pitoisuus on lannassa alkuaan korkea (Luostarinen ym. 2017b), mutta typen hävikki on suuri avoimissa varjotaloissa sekä lannan pitkän varastoinnin ja/tai kompostoinnin myötä. Näin ollen peltokäyttöön päätyvässä lannassa typpeä on selvästi eritettyä typpipitoisuutta vähemmän ja lannan fosforin ja typen suhde muuttunut voimakkaasti fosforipainotteiseksi.

1.3 Turkiseläinten kasvatusta ja lannankäsittelyä

Turkistilojen toiminta esitetään tässä kuvauksena, joka on toteutettu yhdessä Suomen turkiseläinten kasvattajain liiton (FIFUR) ja turkistuotannon ympäristökonsulttien kanssa. Kuvaus vastaa ympäristö-

¹ Suomensupien lanta on laskettu kettujen lannan tiedoilla ja yhdistetty ketunlannan tietoihin.

hallinnon turkistarhauksen ympäristönsuojeluohjetta (YM 2018), mutta keskittyy sitä enemmän käytännön toteutuneisiin toimiin.

Turkistiloilla eläinten kasvatusta etenee vuosisyklissä, joka alkaa kunkin vuoden alussa siitoseläinten (naaraat ja urokset) valmistelulla uuteen lisääntymiskauteen. Ketut pääasiassa keinosiemennetään, minkä vuoksi siitosuroksia on selvästi siitosnaaraita vähemmän. Minkit puolestaan paritetaan, joten siitosuroksia tarvitaan enemmän. Naaraat penikoivat huhti-kesäkuulla ja pentuekoko vaihtelee siitosnaaraittain, tiloittain ja vuosittain. Pennut vieroitetaan noin kahden kuukauden iässä ja niitä kasvatetaan marras-joulukuulle. Pennut nahkotaan joko tilakohtaisissa tai keskitetyissä nahkomoissa, minkä jälkeen tiloille jäävät vain siitosnaaraat ja -urokset.

Turkiseläimet kasvatetaan pääasiassa varjotaloissa lukuun ottamatta muutamia kymmeniä minkkihalleja. Varjotaloissa eläimet ovat katoksen suojassa häkeissään (Kuva 1). Eläinten rehu annostellaan häkkien päälle, jolloin osa siitä voi tippua suoraan varjotalon alle kertyvän lannan joukkoon. Eläimillä on juoma-automaatit veden saamisen varmistamiseksi. Ne saattavat leikkiä automaattien nipoilla, jolloin vettä päätyy tarpeettomasti varjotalojen alle lantaan. Myös eläinten eritteet tippuvat häkistä varjotalojen alle. Lämpimällä ja tuulisella säällä merkittävä osa typpipitoisesta virtsasta voi haihtua jo ennen päätymistään lannan joukkoon. Loput virtsasta ja sonta tippuvat varjotalon alle kertyvän lannan pinnalle.



Kuva 1. Suomessa turkiseläimet kasvatetaan pääasiassa varjotaloissa (kuvat: Sari Luostarinen, Luke).

Varjotalojen alle on asennettu yleensä v-muotoinen ja vettä läpäisemätön kalvo, jonka avulla lannan läpi suotautuva neste (virtsaa ja muuta varjotalon alle päätyvää vettä) kerätään erikseen umpisäiliöihin. Kertyvän nesteen määrä vaihtelee ja se hyödynnetään laimeahkona lannoitusvetenä. Vedet varjotalojen katoilta ja väleistä johdetaan sadevesien keräysjärjestelmiin eivätkä ne päädy lannan tai siitä suotautuvan nesteen joukkoon.

Turkiseläinten lanta poistetaan varjotalojen alta pääasiassa kerran vuodessa ketuilla ja kolme kertaa vuodessa minkeillä. Minkeillä tiheämpi poistoväli on tarpeen siksi, että toisin kuin ketut ja suomensupit, minkki ulostaa mielellään samaan kohtaan ja varjotalon alle muodostuu sontatorneja (Kuva 2). Lanta poistetaan varjotalojen alta ja halleista koneellisesti. Varjotalojen lannanpoistoon käytetään traktorin etukuormaajaan liitettäviä lantakauhoja, lantatalikolla varustettuja pienkuormaajia sekä kauhan nivelkääntölaitteella varustettuja kaivinkoneita. Halleista lanta poistetaan pienkuormaajilla.



Kuva 2. Lantaa kettujen (vas.) ja minkkien (oik.) varjotalojen alla (kuvat: Sari Luostarinen, Luke).

Lannan poiston jälkeen varjotalojen alle lisätään vaihtelevassa määrin kuiviketta. Sen tarkoitus on vähentää lannasta muodostuvia typpitappioita, hajuja ja karpäsongelmaa (munivat lantaan) sekä vähäisemmässä määrin imeä nesteitä. Kuivikekerros helpottaa myös lannan poistoa ja vähentää hiekan päätymistä lannan joukkoon poiston yhteydessä. Myös minkkien pesien kuivikkeista osa tippuu lannan joukkoon. Kuiviketta ohjeistetaan lisäämään aika-ajoin myös kertyvän lannan päälle (YM 2008), mutta käytännöt vaihtelevat ja lantojen kuivutusta hyödynnetään harvoin optimaalisesti. Lisäksi kuivikkeiden laatu (esim. turve, olki) vaihtelee ja vaikuttaa myös lannan laatuun ja muodostuviin typpitappioihin. Kuivikkeen käytöstä on niukalti koottua tietoa, mutta Luonnonvarakeskuksen ja Suomen ympäristökeskuksen vuonna 2015 turkistiloille toteuttaman kyselyn perusteella yleisimmät käytetyt kuivikkeet olivat turve, olki ja kutterilastu (Luostarinen ym. 2017b). Valitettavasti kyselyn vastausprosentti jäi alhaiseksi eivätkä tulokset siten ole kattavia.

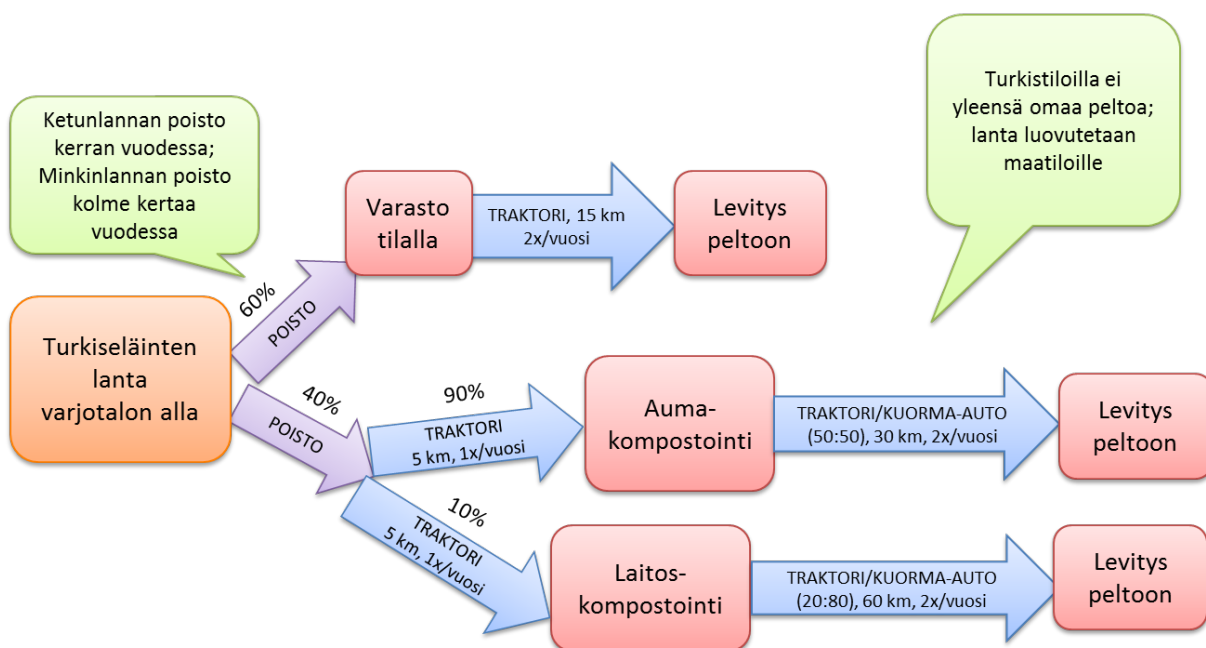
Koska turkiseläinten lantaa poistetaan varjotalojen alta harvoin, se on alttiina vallitseville sääolosuhteille ja etenkin merkittävillä typpitappioille. Lannan kuiva-ainepitoisuus on yleensä korkea, vaikka joskus turkiseläinten lannan käsittely voi vaikeutua lantaan joutuvaan viistosateen tai vuotavien juomalaitteiden alentaessa sen kuiva-ainepitoisuutta. Lannan kuivumisen ja jäätymisen sekä käytetyn kuivituskäytännön vuoksi turkiseläinten lanta varjotaloista muistuttaa lantatyypeistä eniten kuivikelantaa. Poistettu lanta kuljetetaan lannan kompostointiin, tai tilan lantavaraston tai lyhytaikaisen peltoauman kautta lannoitettaville pelloille. Arviolta 60 % muodostuvasta lannasta varastoidaan turkistiloilla (varjotalojen alla, lantavarastoissa) tai vastaanottavilla maatiloilla (lyhytaikainen peltoauma). Lantavarastoissa se saattaa osin spontaanisti kompostoitua ("palaa"), ja joillain tiloilla kompostoitumista voidaan edistää kääntämällä lantaa. Lantavarastot ovat pääasiassa kattamattomia ja lyhytaikaiset peltoaumat ovat myös tavanomaisia.

Pääasiallinen turkiseläinten lannan prosessointi (40 % kaikesta lannasta) on keskitetty kompostointi joko laitoksissa tai aumakentillä. Kompostointi arvioidaan toteutettavan suurelta osin aumoissa (90 %) laitoskompostoinnin ollessa vähäisempää (täsmällisiä tilastoja määristä ei ole saatavilla). Aumakompostoinnissa tukiaineena käytetään turkistuotannon ympäristökonsulttien mukaan olkea (80 %) tai turvetta (20 %), ja laitoksissa lähinnä turvetta (90 %) oljen osuuden jäädessä vähäiseksi (10 %). Aumakompostoinnissa muodostuu sääolosuhteista riippuen vaihtelevia määriä suotovesiä, jotka tulisi käsitellä siten, ettei niistä aiheudu ravinnepäästöjä lähivesiin (YM 2018). Käytännössä niiden puhdistaminen on haastavaa, sillä niiden määrä ja ravinnepitoisuus vaihtelee ennakoimattomasti ja kompostointikentät on usein sijoitettu syrjäisille alueille, joilla ei välttämättä ole sähköistystä. Laitoskompostoinnissa toimitaan suljetuissa rakennuksissa, jolloin vastaavaa suotovesien haastetta ei muodostu.

Harva turkistila viljelee itse, joten lannalle ei yleensä ole käyttöä turkistuotannossa. Näin ollen lantaa luovutetaan tai myydään suoraan tiloilta (60 %) tai kompostoinnista (40 %) kasvintuotantotiloille. Tiloilta varastoitu lanta kuljetetaan lähialueen maatiloille lannoitteeksi. Keskimääräiseksi kuljetusmatkaksi on tällöin arvioitu 15 km ja kuljetus toteutetaan pääasiassa traktoreilla pari kertaa vuodessa. Keskitetyn kompostoinnin sijainti vaikuttaa lannan kuljetusmatkaan tilalta kompostointiin. Sen on arvioitu olevan keskimäärin 5 km ja tapahtuvan kerran vuodessa traktoreilla. Valmiin lantakompostin kuljetus kasvintuotantotiloille tapahtuu yleensä kahdesti vuodessa. Keskimääräinen kuljetusmatka aumakompostoinnista on 30 km ja tapahtuu traktoreilla lähialueelle (50 %) ja kuorma-autoilla kauemmas (50 %). Laitoskompostoitu tuote kuljetetaan tätä pidemmälle keskimääräisen kuljetusmatkan ollessa 60 km, ja kuljetuskalustona toimivat kuorma-auto (90 %) ja traktori (10 %).

Täsmällistä tietoa turkiseläinten lannan hyödyntämisestä pelloilla on niukalti. Lanta päätyy pääasiassa luovutussopimuksella peltolannoitteeksi turkistilojen lähellä oleville tiloille (MMM 2018). Lannasta suurin osa levitetään pelloille keväällä ja loput syksyllä. Suoran peltolevityksen mahdollisuutta rajoittaa peltojen pääasiallisen lannoitustarpeen ajoittuminen kevääseen, kun taas lannan poistoajankohtia ajoittuu myös muihin vuodenaikoihin. Esimerkiksi kansallisessa maatalouden tyypimallissa (Grönroos ym. 2017) on oletettu, että 95 % lannasta levitetään mullokselle ja 5 % kasvustoon kuivan lannan hajoilevityksenä. Mullokselle levitetystä oletetaan multaamatta jäävän 30 %, kun 60 % mullataan yli 12 tunnin kuluttua levityksestä kyntäen ja 10 % yli 12 tunnin kuluttua levityksestä äestäen.

Koonti turkiseläinten lannan käsittelyn keskimääräisistä nykytoimista on esitetty Kuvassa 3.



Kuva 3. Koonti turkiseläinten lannan nykyisistä käsittelytoimista. Keskimääräisten käsittelymenetelmien osuuksien, kuljetusmatkojen ja kuljetusvälineiden arviot on tehty yhteistyössä turkistuotannon edustajien ja ympäristökonsulttien kanssa. Kuva vastaa ympäristöministeriön (YM 2018) koontia.

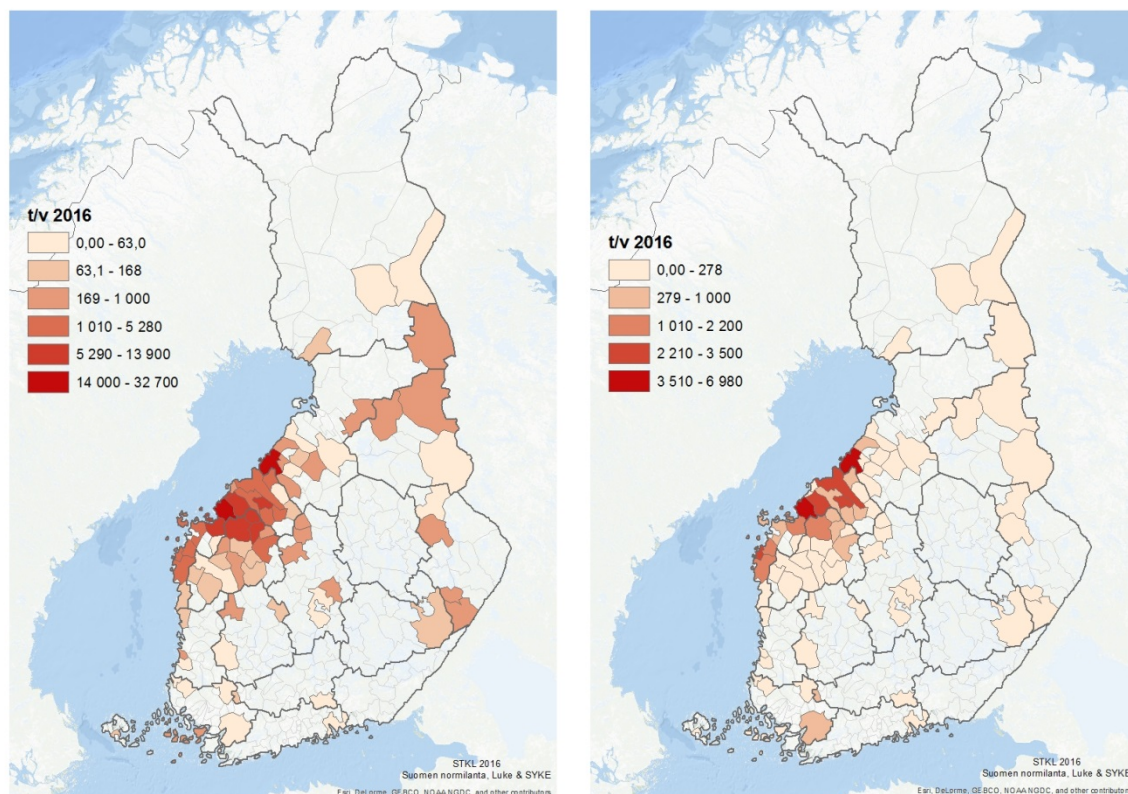
1.4 Turkiseläinten lannan hyödyntämisen haasteet

Turkistiloilla on harvoin omaa levitysalaa lannalle, mutta se ei ole varsinainen syy turkiseläinten lannan hyödyntämisen haasteisiin. Lannan fosforin ja typen suhde on epäsuotuisa kasvin kannalta, mikä heikentää kiinnostusta sen lannoitekäyttöön. Tyypitappioita voisi vähentää esimerkiksi lannanpoiston tiheyttä lisäämällä, mutta käytännössä aikaikkunat lannan poistolle ovat vähäiset. Talvisin lanta jäätyy

eikä sitä pysty poistamaan, ja eläinten lisääntymisen sekä pentujen alkuvaiheen kasvun aikaan eläimiä ei voi koneistetulla lannanpoistolla häiritä.

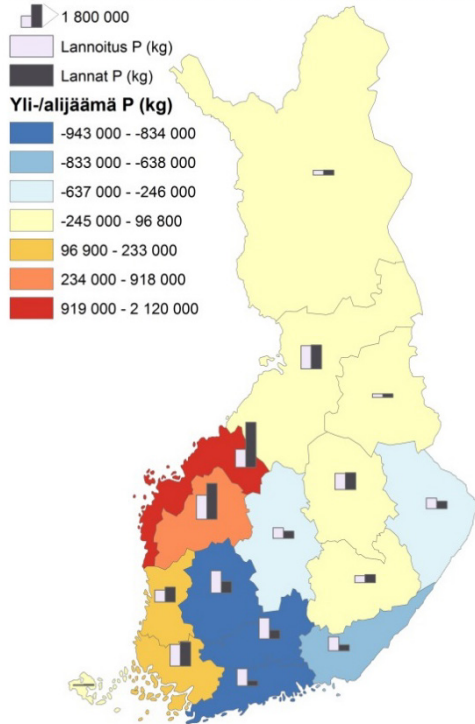
Myös lannan lannoitekäyttöön tarvittava levitysala on kasvanut. Maaseudun kehittämissuunnitelmassa vuosille 2014-2020 turkiseläinten lannan fosforin käyttökelpoisuutta kasveille nostettiin 40 %:sta 60 %:in (muilla eläimillä osuus nykyään 100 %), mikä lisäsi tarvittua levitysala ympäristökorvaukseen sitoutuneilla tiloilla ohjelmakauden taitteessa. Viime vuosina Pohjanmaan maakunnissa turkiseläinten lantaa on toimitettu turkistarhoilta myös laajentavien kotieläintilojen uuden pellon raivaukseen peltojen kuntoonpanovaiheessa, mutta pellon raivausta pyritään tulevaisuudessa voimakkaasti vähentämään muun muassa ilmastosyistä (esim. MALULU-selvitys, Aakkula ym. 2019). Lisäksi turkiseläinten lannan tarve päättyy raivattujen peltojen saavuttaessa viljelykuntonsa.

Olellaisin haaste turkiseläinten lannan kestäväälle hyödyntämiselle on turkistuotannon sijoittuminen kotieläintuotantoon keskittyneille alueille (Kuva 4), joilla lantaravinteita on runsaasti tarjolla, peltomaan fosforiluvut ovat laajalti korkeat ja fosforilannoituksen tarve on vähäinen (Ylivainio ym. 2014, Marttinen ym. 2017, Lemola ym. 2018, Luostarinen ym. 2019a, b). Turkistuotannon alueilla on voimakas lantafosforin ylitarjonta (Kuva 5), joka ylläpitää korkeita fosforilukuja peltomaassa tai jopa nostaa niitä. Samalla nousee riski epäsuotuisiin ympäristövaikutuksiin, kuten vesistöjen rehevöitymiseen. Koska turkiseläinten lanta on fosforipitoista, tarvitaan ratkaisuja lannan jalostamiseksi muotoon, joka mahdollistaa sen kuljettamisen alueille, joilla fosforilannoitusta tarvitaan.



Kuva 4. Kettujen ja suomensupien (vas.) sekä minkkien (oik.) lantojen määrät (tonnia/vuosi) ja sijainnit kunnittain.

Kasvin tarpeen mukainen fosforilannoitus ja lantafosfori



Kuva 5. Kartta kaiken lantafosforin yli- ja alijäämästä ELY-alueittain huomioiden muodostuvan lantafosforin määrä sekä alueen kasvintuotanto, peltomaan fosforiluvut ja kasvin tarpeen mukainen fosforilannoitus (Ravinnelaskuri, viranomaiskäyttöön luotu työkalu alueellisten ravinnekiertojen suunnitteluun, Luke & SYKE).

2 Lannan prosessoinnin mahdollisuudet

Lantaa voidaan prosessoida erilaisin teknologioin siten, että lantaravinteita erotellaan ja väkevöidään uudenaikaisiksi lannoitevalmisteiksi. Prosessivalinnasta riippuen samalla voidaan tuottaa uusiutuvaa energiaa. Prosessikokonaisuuksista olennaista on varmistaa kaikkien osaprosessien ja -toimien päästöjen hallinta ja lopputuotteiden soveltuvuus käyttökohteisiinsa.

Lantaa voidaan prosessoida lukuisilla erilaisilla teknologioilla siten, että siitä muodostuu erilaisia lannoitevalmisteita (Marttinen ym. 2017, Luostarinen ym. 2019a, Paavola ym. 2019a). Myös turkiseläinten lannalla jo käytössä oleva kompostointi on yksi prosessointiteknologia, mutta se ei mahdollista lantaravinteiden voimakasta väkevöintiä pienempään ja siten kuljetettavampaan tilavuuteen eikä lannan fosforin ja typen erottelua omiin lannoitevalmistejakeisiinsa. Kompostoinnin heikkouksia ovat myös merkittävät typpihävikit (n. 60 % lannan kokonaistypestä menetetään pääasiassa ammoniakkinä ja dityppioksidinä; Vuorio 2001) ja hapettomissa taskuissa muodostuvat metaanipäästöt (Myllymaa ym. 2008). Hiiltä menetetään myös hiilidioksidinä. Kompostoinnin etuina pidetään lämpötilan nousun myötä saavutettavissa olevaa lannan hygienisoitumista sekä massan sekoittumista homogeeniseksi ja hajuttomammaksi lopputuotteeksi.

Aumakompostoinnissa typen talteenotto on mahdotonta ja lannan tyypestä menetetään merkittävä osa. Myös laitostuompostoinnissa typen hävikki voi olla suurta, mutta sitä voidaan vähentää ottamalla typpiyhdisteitä talteen poistoilmasta biosuodattimella tai biologisella tai kemiallisella kaasupesurilla (Tuovinen 2002). Kypsytämisen ja huonosti ilmastettu kompostointimassa saattaa sisältää voimakkaita kasvihuonekaasuja (metaani ja dityppioksidi), jotka voivat varastoinnin ja kuljetuksen aikana vapautua ilmakehään (Tontti & Mäkelä-Kurtto 1999). Hiilipitoisilla tukiaineilla voidaan vähentää metaanin, ammoniakkinä sekä typpioksididulin haihtumista kompostoinnin aikana (Rekilä ym. 2004, Amon ym. 2006, Vuorio 2001). Keinoja ympäristökuormituksen vähentämiseksi ja lannan lannoitearvon ylläpitämiseksi ovat riittävä ja oikeanlaisen tukiaineen käyttö, hapellisten olosuhteiden varmistaminen, vesitiiviit suljetut kompostoinnin rakenteet ja haihtuneen typen talteenotto. Toimenpiteitä voidaan toteuttaa soveltuvien osien sekä auma- että laitostuompostoinnissa.

Turkiseläinten lannan prosessointiteknologioita olisi mahdollista kehittää siten, että typpi ja fosfori voidaan ottaa talteen erillisiin lannoitevalmisteisiin ja hyödyntää siellä, missä tarvetta on. Tällöin vähennetään tehokkaimmin sekä uusiutumattomien fosforivarantojen (Cordell ym. 2011) että energiain- tensiivisin kemiallisin menetelmin tuotettujen typpilannoitteiden tarvetta, kun käytössä olevat ravinteet kiertävät nykyistä tehokkaammin alueellisesti ja alueelta toiselle. Samalla voidaan vähentää painetta uusien peltoalojen raivaamiseen ja alueella muodostuvia ravinnepäästöjä ilmaan ja vesiin. Toimintatapojen tehostaminen voi myös edistää uuden liiketoiminnan syntymistä (Luostarinen ym. 2019a).

Prosessoinnin vaikutus lannan kuljetettavuuteen, varastointiin, levitysmenetelmiin sekä lannoitearvoon on keskeisessä asemassa uusien käsittelyketjujen suunniteltaessa. Muodostuvan lannoitevalmisteen tulee olla turvallinen ja riittävän väkevä ravinteiltaan, jotta kuljettaminen on kannattavaa (Marttinen ym. 2017). Lannan prosessointi vaikuttaa myös lannan orgaanisen aineksen määrään ja ominaisuuksiin. Orgaanisen aineksen lisääminen ylläpitää tai jopa lisää peltomaan hiilen määrää ja parantaa sen rakennetta ja kasvukuntoa. Se voi näin ollen osaltaan hillitä ilmastonmuutosta ja vesistöpäästöjä. Orgaanisen aineksen kuljetettavuuden paraneminen prosessoinnin myötä mahdollistaa kuljettamisen alueille, joilla peltomaan orgaanisen aineksen pitoisuus on laskussa (Heikkinen ym. 2020). Prosessiteknologiasta riippuen myös lannan energiasisältö voidaan hyödyntää uusiutuvan energian tuotannossa sähköinä, lämpönä ja/tai liikenteen polttoaineena. Fossiilisten polttoaineiden korvaamisella voidaan saavuttaa suurimmat ilmastohyödyt.

2.1 Vaihtoehdot turkiseläinten lannan prosessointiin

Turkiseläinten lannan nykyisten käsittelymenetelmien (suora peltolevitys, kompostointi) vaihtoehtoina tarkasteltiin biokaasutusta ja pyrolyysiä sekä näiden yhdistelmää. Prosessointitavat valittiin huomioiden eri menetelmien mahdollisuudet väkevöidä ja erotella lantaravinteita tehokkaasti uusiksi, kuljetettaviksi lannoitevalmisteiksi sekä toimia energiaomavaraisesti tai tuottaa ylimäärin energiaa muualla hyödynnettäväksi. Hankkeessa toteutetut biokaasuratkaisujen ja pyrolyysin teknistaloudelliset tarkastelut koettiin on raportoitu erillisissä osaraporteissa (Sarvi ym. 2020 ja Tampio ym. 2020).

2.1.1 Lannan biokaasutus



Turun biokaasulaitos, Gasum (kuva: Annika Johansson, SYKE).

Lannan biokaasutus eli mädätys ja mädätteen jatkojalostus väkevöidyiksi lannoitevalmisteiksi mahdollistaa tehokkaan yhtäaikaisen eri ravinteiden hyödyntämisen ja uusiutuvan energian tuottamisen. Biokaasulaitoksella voidaan käsitellä turkiseläinten lantaa sellaisenaan tai yhdessä muiden lantojen tai orgaanisten biomassojen kanssa. Turkiseläinten lannan korkean kuiva-ainepitoisuuden takia syöttäminen märkämädätykseen vaatii yhteismädätystä esimerkiksi lietelantojen kanssa tai nesteen lisäämistä tai kierrättämistä mädätteestä syötteeseen. Myös kuivamädätys on mahdollista.

Mädätyksessä osa lannan orgaanisesta aineksesta hajoaa mikrobien toimesta hapettomissa olosuhteissa tuottaen biokaasua, joka sisältää tyypillisesti 50-70 % metaania. Pääosa loppukaasusta on hiilidioksidia ja pieniä osuuksia muita yhdisteitä, kuten vesihöyryä ja rikkiyhdisteitä (Kymäläinen & Pakarinen 2015). Biokaasu voidaan hyödyntää sähkön, lämmön ja/tai liikennepolttoaineen tuotannossa. Prosessin toinen lopputuote on mädäte, joka sisältää kaikki syötteiden ravinteet ja anaerobisesti hajoamattoman, hitaasti hajoavan hiilen. Mädäte voidaan hyödyntää lannoitevalmisteena sellaisenaan, mutta mitä suuremmasta biokaasulaitoksesta on kyse, sitä suuremmaksi tulee tarve jatkojalostaa mädätettä (Luostarinen ym. 2019b). Yksinkertaisin mahdollisuus on separoida mädäte kuiva- ja nestejakeiksi,

joista kuivajae sisältää käytetyn laitteen separointitehosta riippuen pääosan fosforista liukoisen typen päätyessä nestejakeeseen. Separoituja jakeita voidaan edelleen väkevöidä ja erotella monien erilaisten prosessiteknologioiden, kuten ammoniakkin strippauksen, kalvosuodatuksen tai kuivauksen avulla (Luostarinen ym. 2019a). Biokaasuprosessissa liukoisen typen osuus kasvaa orgaanisen typen hajotessa ammoniumtypeksi ja siten tyyppi on mädätteessä paremmin kasvien hyödynnettävissä kuin raakalannassa (Marttinen ym. 2015). Lannan sisältämä fosfori ja kalium eivät juurikaan liukoistu prosessin aikana (Palva ym. 2018).

Biokaasulaitos tarvitsee lämpöä reaktorin lämmittämiseen mikrobeille optimaaliseen lämpötilaan (mesofiilinen noin 37 °C tai termofiilinen noin 55 °C). Lämpöä voidaan tarvita myös syötteiden tai mädätteen erilliseen hygienisointiin. Lisäksi laitos kuluttaa sähköä esimerkiksi reaktorin sekoitukseen, syötteiden ja mädätteen pumppauksiin sekä mahdollisiin mädätteen jatkojalostuksen ratkaisuihin. Laitoksella saatetaan tarvita myös kemikaaleja mm. pH:n säätöön. Varsinaisen biokaasuprosessin (reaktori syöttöineen ja poistoineen) energiankulutus on yleensä noin 23-35 % tuotetun biokaasun energiasisällöstä (Marttinen ym. 2015).

Hyvin toimivan ja hallitun biokaasulaitoksen metaanipäästöt ovat alhaiset. Prosessin osaava suunnittelu, ylläpito ja hallinta ovat sille edellytys. Kaasuvuotoja tapahtuu silti vähäisessä määrin laitoksen rakenteista. On tärkeää, että biokaasuprosessin viipymä on riittävän pitkä syötemassojen hajoamiseksi mahdollisimman pitkälle. Tämä voidaan toteuttaa pelkässä reaktorissa tai reaktorin ja jälkikaasualtaan yhdistelmänä. Näin kaasuntuotantokapasiteetti saadaan hyödynnettyä ja metaanipäästöt mädätteen varastoinnista jäävät mahdollisimman pieniksi. Metaanivuotojen minimointi on keskeistä, sillä jo pienetkin metaanivuodot heikentävät biokaasulla tavoiteltavia ilmastohyötyjä.

2.1.2 Lannan pyrolysointi

Pyrolyysi on orgaanisen materiaalin termokemiallista hajoamista vähähappisissa tai hapettomissa olosuhteissa 250-700 °C lämpötilassa (Kujala 2012, Laitinen 2015). Pyrolyysin lopputuotteina syntyy hiilijakeetta, pyrolyysinestettä ja -kaasua. Nykyinen kiinnostus pyrolyysiin liittyy maanparannuksen lisäksi tarpeeseen löytää ratkaisuja ilmastonmuutoksen hillintään, energiantuotantoon, jätehuoltoon, ravinteiden kiertoon ja lannan levityksen haasteisiin (Cantrell ym. 2012). Lannan pyrolysointi pienentää lannan tilavuutta ja massaa sekä väkevöi fosforia hiilijakeeseen, mikä edesauttaa sen kuljettamista pidemmälle fosforia tarvitseville pelloille.

Pyrolyysin lähes hapettomissa olosuhteissa lannan monimutkaiset molekyylit hajoavat pienemmiksi ja yksinkertaisemmiksi molekyyleiksi (Basu 2010). Pyrolyysissä muodostuvien lopputuotteiden osuudet ja ominaisuudet riippuvat syötteen koostumuksesta, kosteudesta ja partikkelikoosta sekä pyrolyysin lämpötilasta ja lämmitysnopeudesta (Zanzi 2001, Prins 2005, Bridgwater 2007, Onarheim ym. 2015). Nopea pyrolyysi, jossa nosto maksimilämpötilaan tapahtuu sekunneissa, tuottaa enemmän nestettä (Tripathi ym. 2015). Hitaassa pyrolyysissä maksimoidaan taas hiilijakeen saanto (Strand 2011).

Pyrolyysissä materiaalin hajoaminen lopputuotteiksi on endoterminen eli lämpöä sitova kemiallinen reaktio, johon siis tarvitaan energiaa. Myös syötteen esikuivaukseen tarvitaan energiaa, mutta osa kuivausenergiasta voidaan ottaa talteen kuivausilman lauhdutuksessa (Kauppi 2018). Pyrolyysi itsessään ei tuota prosessissa hyödynnettävää lämpöenergiaa, vaan pikemminkin prosessista karkaa hukkalämpöä. Sen sijaan pyrolyysin lopputuotteiden, eli pyrolyysikaasun ja -nesteiden sekä hiilijakeen, sisältämä kemiallinen energia on mahdollista hyödyntää pyrolyysiprosessissa. Pyrolyysin hiilijakeen jäähtymisestä poistuvaa lämpöenergiaa ei välttämättä voida hyödyntää prosessissa hiilen huonon lämmönjohtavuuden vuoksi, kuten jätevesilietteestä tuotetun biohiilen kohdalla on todettu (Kauppi 2018). Pyrolyysikaasu ja -neste voidaan esimerkiksi polttaa pyrolyysin esikuivauksen ja/tai pyrolyysin lämmön tarpeeseen.

Varsinkin turkiseläinten lannan, mutta myös muiden lantojen pyrolysoinnista on kirjoitushetkellä melko vähän (tieteellistä) tietoa ja täyden mittakaavan sovelluksia. Kasviperäisen materiaalin, kuten

puun, pyrolysointi on tutkitumpaa ja myös käytännön kokemuksia on enemmän saatavilla. Lannan ja puun prosessointi eroavat kuitenkin toisistaan, sillä mm. syötemateriaalin ominaisuudet sekä muodostuvat lopputuotteet ovat erilaisia. Lanta on puuta tuhkapitoisempaa ja sen hiilipitoisuus on alhaisempi (alle 50 %) (Cantrell ym. 2012, Sarvi ym. 2020). Euroopan biohiilisertifikaatin mukaan alle 50 % hiilipitoisuuden omaavia hiilijakeita ei lueta biohiileksi vaan pyrolysoituksi hiilipitoiseksi materiaaliksi (EBC 2012). Tästä huolimatta myös biohiili-nimitystä on käytetty lantapohjaisilla hiilijakeilla, etenkin kun jaetta käytetään maanparannusaineena (Cantrell ym. 2012, Ro ym. 2010, Huygens ym. 2019). Tässä raportissa käytetään termiä hiilijae kaikista lantapohjaisista pyrolyysin hiilituotteista.

Pyrolyysin lopputuotteena syntyvän biohiilen ominaisuudet riippuvat syötteen ominaisuuksista sekä käytetystä pyrolyysiprosessista. Tästä johtuen sillä on erilaisia optimaalisia käyttökohteita (Riikonen 2017). Biohiilen maaperä- ja ravinnevaikutukset ovat tapauskohtaisia ja riippuvaisia mm. tuotetun hiilijakeen ja käyttökohteena olevan maaperän ominaisuuksista sekä hiilijakeen levitysmäärästä. Biohiilellä saattaa olla maanparannusvaikutuksia esimerkiksi sen rakenteen huokoisuudesta johtuen, ja se saattaa lisätä maaperän vedenpidätyskykyä, kasvien ravinteiden saantia, maaperän huokoisuutta, mikrobien biomassaa ja orgaanisen hiilen määrää, sekä vähentää maaperän tilavuuspainoa. Puuperäisillä biohiilillä on todettu olevan parempi vedenpidätyskyky kuin esimerkiksi kanan- (Keskinen ym. 2019) tai naudannan hiilijakeilla (Lei & Zhang 2013). Tuhkapitoisten lantojen tuottamien hiilijakeiden korkea pH arvo laskee maaperän kalkitustarvetta etenkin happamilla mailla (Chan ym. 2008). Se ei kuitenkaan todennäköisesti täytä EU:n lannoiteasetuksen (2019/1009) kalkitusvaatimuksia eikä siten poista maaperän kalkitsemistarvetta (Huygens ym. 2019).

Pyrolyysissä menetetään lannan liukoinen tyyppi ja osa orgaanisesta tyypestä, kun taas fosfori väkevöityy hiilijakeeseen. Fosforin liukoisuus hiilijakeessa on kuitenkin heikompi kuin lannassa (esim. Keskinen ym. 2019, Sarvi ym. 2020). Tämä ei kuitenkaan välttämättä muuta kasvien mahdollisuutta hyödyntää fosforia (Sarvi ym. 2020). Osa tyypestä on mahdollista ottaa talteen pyrolyysia edeltävissä prosessivaiheissa.

Kasviperäisen biohiilen hiili on erittäin pysyvässä muodossa ja sen avulla voidaan varastoida hiiltä maaperään (Heikkinen ym. 2020). Arviolta jopa 80 % puupohjaisten biohiilien hiilestä on jäljellä vielä 100 vuoden jälkeen (Roberts ym. 2010, Bergman ym. 2017). Sen sijaan pyrolysoidun lannan hiilijakeen pysyvyydestä ei tiettävästi ole olemassa vastaavaa tutkimustietoa. Kasviperäisen biohiilen on myös todettu voivan lisätä orgaanisen aineksen, kuten juurista tulevien hiiliyhdisteiden stabiloitumista maahan, jonka kautta muodostuu epäsuora hiilivaikutus (Weng ym. 2017).

Biohiili/hiilijae voi olla herkästi syttyvää, erityisesti sakeana pölynä, ja joissain maissa se on luokiteltu palovaaralliseksi aineeksi (Riikonen 2017). Niinpä sen käyttö saattaa edellyttää kostuttamista, joka samalla vähentää hiilen pölyämistä.

3 Lantaketjun tehostaminen tilakohtaisilla toimenpiteillä

Tilakohtaisilla toimenpiteillä voidaan tehostaa turkiseläinten lannan käsittelyketjua, mutta ne eivät yksinään ratkaise siihen liittyviä haasteita. Sen sijaan ne toimivat hyvinä käytäntöinä, joilla voidaan vähentää lannasta aiheutuvaa ympäristökuormitusta ja hajua sekä lisätä lannan arvoa lannoitteena.

Tässä osiossa käsitellään yksittäisiä tilakohtaisia toimenpiteitä, jotka tähtäävät pääasiassa vähentämään ammoniakkin haihtumista ja siten ylläpitämään lannan lannoitearvoa. Typpitappioiden minimoinnilla voidaan ehkäistä lannan fosforin ja typen suhteen heikkenemistä kasvien kannalta epäedulliseksi, mikä vähentäisi myös mineraalitypen tarvetta. Typen haihtumisen vähentäminen vähentää myös pienhiukkas-ten muodostumista sekä rehevöittävää ja happamoittavaa laskeumaa (YM 2018, Iivonen 2008). Toimenpiteiden hyödyllisyyden varmistamiseksi tulee lannankäsittelyketju huomioida aina kokonaisuutena. Typpitappioiden vähentäminen yhdessä vaiheessa saattaa lisätä tappioiden riskiä lantaprosessin myöhemmissä vaiheissa.

Esitettyjen toimenpiteiden käytännön toteuttaminen voi olla tiloilla haastavaa mm. eläinten häiriintymisen vuoksi, tai ne voivat vaatia tiloilta investointeja, joiden kannattavuus näkyy vasta pidemmällä aikavälillä tai ei ole taloudellisesti mitattavissa. Niiden toteutettavuutta tulisikin arvioida erikseen.

3.1 Ruokinnan täsmentäminen

Lantaan erittyvien ravinteiden vähentäminen on keskeisessä roolissa turkiseläinten lannan käsittelyn kehittämisessä (Luostarinen ym. 2017b). Siihen voidaan vaikuttaa eläinten ruokintaa täsmentämällä.

Lantaa muodostuu noin 35 – 41 % tarjotun rehun painosta ja lanta sisältää noin 26 – 33 % tarjotun rehun typpimäärästä ja noin 58 – 86 % fosforimäärästä (Luostarinen ym. 2017b). Eläimen ravinnetarpeen ylittävä osa päättyy lantaan. Rehun valkuaispitoisuutta alentamalla on vähennetty valkuaisyliruokintaa ja siten lannan typpipitoisuutta, ja luuainesta vähentämällä taas on vähennetty lannan fosforin määrää (Rekilä ym. 2004). Rehun ravinnepitoisuuksien pienentäminen on kuitenkin edelleen ajankoh- taista, sillä esimerkiksi kettujen rehu sisältää yhä fosforia noin kolme kertaa yli tarpeen (Luostarinen ym. 2017b). Rehu valmistetaan pääasiassa rehusekoittamoissa, joten muutoksia rehun koostumukseen voidaan tehdä keskitetysti.

Turkiseläinten ravinnetarve ja sitä vastaava rehuntuotanto vaihtelevat eläinlajeittain, vuodenajan ja elämänvaiheen mukaan (Rekilä ym. 2009). Ruokinnassa on hyödynnetty rehuannostelijoita jo noin 20 vuotta, ja tällä hetkellä rehu voidaan annostella laitteilla häkkikohtaisesti eläinten ravinnontarpeet huomioiden ja tiedot voidaan tallentaa koneen muistiin (Sepponen & Eskeli 2012). Digitaalitekniikka ja automaattiruokinnan edistyminen alentavat ruokinnan työvoimakustannuksia ja vähentävät ympäristö- kuormitusriskiä ja rehunkulutusta (YM 2018). Turkiseläinten häkeissä yksilöity ruokinta on haasteellista, koska häkeissä on monta yksilöä, mutta tarve häkkikohtaisen ruokinnan optimoinnille on olemassa (Luostarinen ym. 2017b).

3.2 Kuivikkeen lisääminen

Kuiviketyypillä ja sen optimaalisella käytöllä voidaan edistää ravinteiden pidättymistä lantaan ja ehkäistä ammoniakkipäästöjen muodostumista varjotalojen alla. Typen haihtumista voitaisiin vähentää lisäämällä kuiviketta nykyistä paljon useammin varjotalojen alle. Turpeen käyttö kuivikemateriaalina tulisi korvata ympäristöystävällisemmillä ja lannan jatkokäyttöä tukevilla materiaaleilla.

Kuiviketta lisätään varjotalon alle helpottamaan lannanpoistoa (Luostarinen ym. 2017b), estämään lantapenkan kulumista (Rekilä ym. 2004) sekä vähentämään hajuhaittoja. Kuivike vähentää myös eläinten stressiä ja sairastavuutta lisäävien karpästen ja karpästoukkien määrää (Rekilä ym. 2004). Kuiviketta lisätään lannanpoiston yhteydessä sekä satunnaisesti, jos lainkaan, lannanpoistojen välillä. Turkistilojen ympäristöohjeen mukaan lannanpoiston jälkeen varjotalon alle lisättävän kuivikekerroksen tulisi olla vähintään 10 – 15 cm paksu, ja kuiviketta tulisi lisätä ainakin kerran lannanpoistojen välillä (YM 2018). Ketut ja minkit käyttäytyvät eri tavoin ja kuiviketta tarvitaan kettutarhoilla minkkitarhoja enemmän, sillä eläinten koko ja käyttäytyminen ovat erilaisia. Toisaalta minkkien muodostaessa korkeita lantakasoja myös lannan päälle lisätyn kuivikkeen vaikutus jää pienemmäksi.

Turkistilojen kuivikkeiden käytöstä ja käyttömääristä on vain vähän tutkimustietoa (Luostarinen ym. 2017; Iivonen 2008). Arvioiden mukaan kuivikkeena käytetään ensisijaisesti olkea, mutta myös turvetta ja kutterinlastua (Taulukko 3). Turpeen käyttöä kuivikkeena suositellaan ja jopa edellytetään turkistilojen ympäristöluvuissa mm. sen ammoniakkin sitomiskyvyn vuoksi (Peltola ym. 1986, Kemppainen 1995, Iivonen 2008, YM 2018). Minkkien pesissä käytetyn kuivikkeen tulee eläinsuojelumääräysten mukaisesti olla olkea.

Taulukko 3. Varjotalojen alle kettua ja minkkiä kohden lisättävien kuivikkeiden määrät keskimäärin (Luostarinen ym. 2017b).

Kuivike	Kettu	Minkki
Paalattu olki (m ³ /v)	0,012	0,006
Turve (m ³ /v)	0,01	0,0003
Kutterinlastu (m ³ /v)	0,001	0,002
Yhteensä (m ³ /v)	0,022	0,008

Vaikka turvetta suositellaan käytettäväksi sen typensidonnann vuoksi, se on fossiilinen luonnonvara, jonka käytöstä aiheutuu huomattavasti suurempi ilmastovaikutus kuin uusiutuvien materiaalien käytöstä. Hankintaketjun kasvihuonekaasupäästöt tuoretonnia turvetta kohden ovat 860 kg CO₂, olkipellettiä kohden 87,2 kg CO₂ ja kutterinlastua kohden 44,6 kg CO₂ (Manninen ym. 2016). Turpeen käytön vähentämisen edellytyksenä onkin korvaavien kuivikevaihtoehtojen selvittäminen ja käyttöönotto, johon uutta tietoa tarjoaa muun muassa kirjoitushetkellä käynnissä oleva Luonnonvarakeskuksen ja Suomen ympäristökeskuksen TURVEKE-hanke. Kuivikkeen valintaan vaikuttaa kuivikeominaisuuksien, hygienian ja turvallisuuden lisäksi kuivikkeen hinta, saatavuus ja lannan jatkokäyttö.

3.3 Lannanpoistotiheys

Lannanpoistotiheyden nostaminen vaikuttaisi vähentävästi tarhauksen aikaisiin ammoniakkipäästöihin ja hajuhaittoihin. Lisäksi lannan lannoitearvo säilyisi parempana, mikäli myös muu lannankäsittelyketju toteutettaisiin hyviä käytäntöjä noudattaen. Varjotalojen alla lanta on alttiina sääolosuhteille ja etenkin tuuli, korkea lämpötila sekä sadevesi lisäävät typen haihduntaa (Rekilä ym. 2004). Lannan ammonium-typestä on arvioitu haihtuvan jopa 80 % varjotalojen alla ja varastoinnissa (Luostarinen ym. 2017b). Typen haihdunnan vähentäminen edellyttäisi tiheimmän lannanpoiston lisäksi myös lyhyttä varastointiaikaa katetuissa tai suljetuissa varastoissa ennen peltolevitystä. Toinen vaihtoehto olisi kuljettaa lanta tihennetyn lannanpoiston tahdissa suoraan prosessoitavaksi tilan ulkopuolelle.

Nykyisin lanta poistetaan kettutarhoilla keskimäärin kerran vuodessa ja minkeillä kolme kertaa vuodessa. On suositeltu, että kettutarhoilla lannanpoisto tulisi suorittaa vähintään 1-2 kertaa (syys-lokakuussa ja touko-heinäkuussa) ja minkkitarhoilla 3-5 kertaa vuodessa (3 viikon-2 kuukauden välein) (Rekilä ym. 2004). Suurin osa lannasta muodostuu heinä-marraskuun aikana, jolloin myös lannanpoistotarve olisi suurinta typen haihdunnan minimoimiseksi. Myös lämpötila vaikuttaa typen haihduntaan, joten tiheä lannanpoisto olisi erityisen tärkeää lämpiminä vuodenaikoina. Lannanpoisto syksyllä tulisi liittää osaksi alueen kasvinviljelytoimia, jotta lannan varastointiaika voitaisiin samalla minimoida.

Tihentämällä lannanpoisto suositusten mukaisiksi, tarhauksen aikaisia lannan ammoniakkipäästöjä voitaisiin vähentää noin puoleen (Kuva 6). Käytännössä lannanpoiston tihentäminen saattaa osoittautua tiloilla haasteelliseksi, sillä toimenpide ei saa aiheuttaa häiriötä tiineille eläimille tai pentueille. Lannanpoiston tulisi siten ajoittua ajankohtaan, jolloin se aiheuttaa eläimille mahdollisimman vähän stressiä.

Nykyiset lannanpoistotekniikat ovat vielä varsin kehittymättömiä koneellisia ratkaisuja (MMM 2018, Mikkola ym. 2002) ja uusia kehittyneempiä menetelmiä tarvitaan.

3.4 Lannan varastointi

Merkittävä osa lantaketjun kasvihuonekaasupäästöistä syntyy lannan varastoinnin aikana. Toimintaketjut ja prosessit tulisi suunnitella niin, että lantaa varastoitaisiin mahdollisimman lyhyen aikaa ja katettuna. Varastoinnin aikana muodostuu sekä ilmastoa lämmittäviä kasvihuonekaasuja että ympäristöä happamoittavia ja rehevöittäviä ammoniakkipäästöjä. Lannan varastointiajan lyhentäminen on mahdollista, mikäli lanta ohjataan tehokkaasti prosessoinnin piiriin. Mitä tiiviimmin varastot taas ovat katettuja, sitä paremmin voidaan ehkäistä varastoinnin aikaisia ammoniakkipäästöjä. Turkiseläinten lannan mukaisilla kuivilla lannoilla kiinteät katteet voivat vähentää varastoinnin aikaisia päästöjä noin 10 % kattamattaan varastointiin verrattuna (Webb ym. 2006). Lannan varastointia säätelevän nitraattiasetuksen (1250/2014) mukaan lanta tulee varastoida vesitiiviissä varastossa ja uusien lantaloiden tulee olla katettuja. Jos laskennallinen varastointiaika lyhenisi noin kolmasosaan (6 kk -> 2 kk) ja varastointi tapahtuisi avoimen varastoinnin sijasta katetuissa varastoissa, varastoinnin aikaiset ammoniakkipäästöt vähenisivät arviolta noin 50-60 %.

Turkiseläinten lantaa varastoidaan lantaketjun eri vaiheissa. Lannan varastointitapa, varastoinnin kesto sekä varastointia edeltävät lannankäsittelyn vaiheet vaikuttavat varastoinnissa muodostuviin typpipäästöihin. Koko ketjun hallinta on siten olennaista jatkuen aina lannan levitykseen saakka.

3.5 Lannan levitys

Lanta tulisi levittää keväällä tai syksyllä kylvön yhteydessä tai monivuotisen kasvin kasvukauden alussa, jolloin kasvien ravinne- ja lannoitustarve on suurimmillaan ja ravinteiden huuhtoutumisriski vähäisintä. Lannan levitysmäärässä tulee välttää yli- tai alilannoitusta huomioimalla maaperän, levitetävän lannan sekä viljelykasvien ominaisuudet. Fosforin huuhtoutumisen estämiseksi lannan levitystä tulee välttää jo ennestään fosforirikkaille pelloille. Lannan prosessoiminen kuljetettavaan muotoon mahdollistaa lannan ravinteiden hyödyntämisen nykyistä laajemmalla alueella.

Nykyisin lannasta noin 70 % levitetään keväällä ja 30 % syksyllä ja lanta mullataan yli 12 tunnin kuluessa. Lannan levityksen aikaisia ammoniakkipäästöjä voidaan vähentää multaamalla levitetty lanta tai komposti mahdollisimman pian levityksen jälkeen esimerkiksi kyntämällä tai äestämällä (Palva ym. 2018).

Jos turkistila minimoi typpitappiot lantaketjun aikana, päättyy lannan mukana peltoon enemmän lantaperäistä liukoista typpeä ja mineraalitypen tarve vähenee. Lantaa hyödyntävän tilan tulisi siis vähentää mineraalilannoitteen käyttöä samassa suhteessa, jotta typpeä ei päädy peltoon ylimäärin kasvien tarpeeseen nähden ja typen huuhtoutumisen riski ei suurene. Koska tyypestä muodostuu pellolla ilmastoa voimakkaasti lämmittäviä dityppioksidipäästöjä, typen levitysmäärän suhteuttaminen kasvin tarpeeseen on tärkeää myös kasvihuonekaasupäästöjen hallinnan kannalta. Jos varastointiajan lyhentämisen nimissä lisätään esimerkiksi syyslevityksen osuutta (ilman syyskylvöistä kas via), lantaa hyödyntävällä tilalla ravinteiden huuhtoutumisriski kasvaa. Tasapaino varastoinnin ja levityksen välillä on siksi ympäristövaikutusten kannalta olennaista.

3.6 Turkiseläinten kasvatusta hallissa

Turkiseläinten kasvatusta hallissa on varjotalokasvatusta hallitumpaa, ja se myös vähentää välitöntä ympäristökuormitusta ja edesauttaa lannan ravinteiden päätyä kasvien hyödynnettäviksi. Hallikasvatusta harjoitetaan muutamilla suomalaisilla minkkitiloilla, mutta myös kettujen kasvatusta halleissa olisi mahdollista. Hallien pohjapinta-alan tulee minkkinaarasta kohden olla 1,6 – 1,8 m², ja kettunaarasta kohden 7 – 8 m² (Rekilä ym. 2004).

Halleissa on vesitiiviit pohjat ja suljetut rakenteet, jotka estävät sade- sekä sulamisvesien pääsyn lantaan ja ravinteiden huuhtoutumisen ympäristöön. Halleissa on myös käytössä lämpöeristetyt juomalaitteet ja kuivikkeena turve, jotka vähentävät lantavesien keräämistarvetta (Mikkola ym. 2002) ja ammoniakkipäästöjä (YM 2018). Ammoniakkipäästöjä voidaan vähentää ja siten hallin sisäilmaa parantaa myös lannanpoistotiheyttä lisäämällä (YM 2018). Halleissa lannanpoisto on helpommin koneistettavissa ja lannanpoistotiheys samalla nostettavissa.

Hallikasvatusta kuluttaa varjotaloa enemmän energiaa, sillä halleissa tulee pitää huolta ilmanvaihdosta ja valaistuksesta, jotka varjotaloissa hoituvat luonnollisin menetelmin (Mikkola ym. 2002). Toisaalta ilmanvaihdon yhteydessä voitaisiin hallien poistoilmasta ottaa typpi talteen, esimerkiksi kaasupesurin avulla, ja käyttää se lannoitteena.

3.7 Tilan vesien hallinta ja -talteenotto

Hyvällä tilavesien hallinnalla voidaan vähentää lannan ravinteiden huuhtoutumisriskiä ja vesistöjen rehevöitymistä sekä vähentää lannan märkyyttä ja siten kuivikkeiden käyttötarvetta. Pidättämällä ravinteet lannassa parannetaan lannan lannoitearvoa.

Sade- sekä juomavesien pääsyä lantaan ehkäistään korotetuilla lanta-alustoilla, pitkällä räystäällä sekä toimivilla juoma-automaateilla (YM 2018). Räystäiden tarpeeksi pitkällä pidennyksellä voidaan vähentää lanta-alustan nestemäärää 30 %. Yhdessä lantapenkan korotuksen kanssa voidaan saavuttaa noin 20 – 40 % vähenemä ravinnepäästöihin (Taulukko 4). Suosituksena on, että juomakupeista ja nipoista tippuva vesi ohjattaisiin lanta-alustan ulkopuolelle (Rekilä ym. 2004).

Lisäksi vesienhoidon suunnittelun tavoitteena on, että lannan ravinteiden huuhtoutuminen ympäristöön estetään vuoteen 2021 mennessä kaikilla tiloilla varjotalojen ja hallien alle laitetuilla tiiviillä alustoilla tai valumavesien käsittelyjärjestelmillä, kuten hiekkasuodattimella tai kemiallisella puhdistamolla, ja umpikaivoilla (YM 2018). Vuonna 2018 tiiviitä alustoja oli arviolta käytössä noin 65 % tiloista ja valumavesien käsittelyjärjestelmiä 25 – 40 % tiloista (MMM 2018). Tiivisalustoja käyttämällä voidaan estää lannan ravinteiden huuhtoutuminen kokonaan (YM 2018).

Taulukko 4. Räystäiden pidennyksen ja lanta-alustan korotuksen vaikutukset tilavesien hallintaan (Rekilä ym. 2004).

Toimenpide	Muutos	Vaikutus
Räystäiden pidennys	30 cm:stä 60 cm:n.	30 % vähennys lanta-alustan kerääntyvään nestemäärään
Lanta-alustan korotus	30 cm maanpinnasta	20-30 % vähennys typpi- ja fosforipäästöissä maaperään.
Räystäiden pidennys ja lanta-alustan korotus	Molemmat yli 30 cm	20-40 % ravinnepäästöjen vähennys.

3.8 Yhteenveto

Lantaketjun tehostamistoimien toteutettavuutta ja vaikuttavuutta on havainnollistettu taulukossa 5. Tilakohtaiset toimenpiteet tulee toteuttaa eläinten hyvinvointia vaarantamatta. Kun tarkastellaan turkiseläinten lannan nykyisiä käsittelyratkaisuja tilatasolla, niin edellä mainituista tehostamistoimenpiteistä kuivikemäärän ja lannan poistotiheyden lisääminen, varastointiajan lyhentäminen ja lannan levittäminen

kylvön yhteydessä ovat keskeisimpiä toimia hallita päästöjä. Taloudellisesti haastavia investointitarpeita liittyy suljettujen varastojen rakentamiseen, laitoskompostoinnin lisäämiseen sekä hallikasvatukseen siirtymiseen. Näiden toimenpiteiden vaikutus ympäristökuormituksen vähenemiseen olisi kuitenkin merkittävä ja tekniset ratkaisut ovat saatavilla.

Sen sijaan lannanpoistoon varjotalojen alta tarvitaan uutta tekniikkaa. Esitetyt tehostamistoimenpiteet lisäävät turkiseläinten lannan lannoitearvoa, mikäli päästöjä ei lisätä lannankäsittelyketjun muissa vaiheissa. Lisäksi ruokinnan täsmentämisellä lantaan päätyisi vähemmän ravinteita, mikä vähentäisi kierrätettävien ravinteiden määrää, mutta myös päästöriskejä.

Typpihävikit voisivat vähentyä tihentämällä lannanpoistoväliä, varastoimalla lanta katettuna ja lyhyemmän aikaa sekä multaamalla lanta välittömästi levityksen jälkeen. Kaiken kaikkiaan ammoniakkipäästöjä voidaan esitetyillä toimilla vähentää lähes 40 %. Myös metaanipäästöt vähenisivät, jos lanta ohjautuisi nykytilaa nopeammin peltoon tai prosessointiin.

Taulukko 5. Lantaketjun tehostamistoimenpiteiden toteutettavuus ja vaikuttavuus; + lisäävä ja – vähentävä vaikutus.

Toimenpide	Kustannukset	Toteutettavuus	Tekniikan kehitystarve	Negatiiviset ympäristövaikutukset	Lannan ravinnearvo
Lannan poistotiheyden nostaminen	+ Työkustannus + Kuiviketarve	+ Olemassa oleva toimenpide – Eläinten hyvinvoinnin varmistaminen rajoittaa poistotiheyden nostamista	Ei välttämätöntä, mutta voisi tukea lannanpoistotiheyden nostamista	–	+
Kuivituksen lisääminen ja kuivikkeiden laadun parantaminen	+ Työkustannus + Kuiviketarve	+ Olemassa oleva toimenpide	Ei, mutta tiedontarve kuivikevaihtoehdoille	–	+
Lannan varastoinnin kehittäminen	+ Suljettu varastorakennus + Peitemateriaali + Työmäärä	+ Lannan peittäminen – Suljettu varastorakennus	Ei	–	+
Lannan levityksen kehittäminen	–/+ Lannan prosessoinnin vaikutus levitystekniikoihin	–/+ Lannan prosessoinnin vaikutus levitystekniikoihin +/- Lannan lannoitearvon ja peltomaan ravinnetarpeen kohtaaminen	Ei	–	+
Siirtyminen hallikasvatukseen	+ Investointi hallirakentamiseen, energian kulutus, kuten ilmanvaihto ja valaistus	+ Taloudellinen haaste	Ei	–	+ Mikäli mm. lannanpoistotiheyttä lisätään ja tyyppi otetaan talteen hallin poistoilmasta
Tilavesien hallinta ja -talteenotto	+ Räystäiden pidennys, lantapenkan korotus, tiivisalustat	+ Ympäristöluvan vaatimuksissa	Ei	–	+
Ruokinnan täsmentäminen	+ Yksilöity automaatio- ja digitaalitekniikkaa hyödyntävä ruokinta – Rehun kulutuksen lasku – Työmäärä	– Tilojen vaikutusmahdollisuudet rehukeskusten rehuun	Ei	–	– Täsmällisempi ruokinta vähentää lannan ravinnepitoisuutta

4 Lannankäsittelyn elinkaarien ympäristövaikutusten arviointi

4.1 Elinkaariarviointi menetelmänä

Elinkaariarviointi (Life Cycle Assessment, LCA) on menetelmä, jonka avulla voidaan arvioida toiminnan koko elinkaaren aikaisia ympäristövaikutuksia. Vaikutukset käsittävät tällöin kaikki toiminnan elinkaareen liittyvät toiminnot ja materiaalit alkaen raaka-aineiden hankinnasta, prosessoinnista ja kuljetuksesta sekä huomioiden mahdollisen uudelleenkäytön ja jätteeksi päättymisen. Elinkaariarvioinnin avulla on mahdollista eritellä tarkasteltavan toiminnan elinkaaren eri vaiheiden ympäristövaikutuksia sekä tunnistaa toimintoja ja tekijöitä, joiden ympäristövaikutukset ovat toiminnan elinkaaren aikana kaikkein merkittävimpiä. Elinkaariarviointi on erityisen hyödyllinen menetelmä selvittäessä, miten jonkin elinkaareen liittyvän yksittäisen toiminnan muutos tai siirtyminen kokonaan uuteen prosessointijärjestelmään muuttaa ympäristövaikutuksia. Elinkaariarviointia voidaan siten hyödyntää ohjaamaan päätöksentekoa vähiten ympäristöä kuormittaviin menetelmiin ja toimintoihin. (ISO 14040:2006)

ISO 14040:2006 -standardin mukainen elinkaariarviointi koostuu neljästä vaiheesta:

1. Tavoitteiden ja soveltamisalan määrittelyssä rajataan ajanjakso, massamäärä sekä tarkasteltavat ympäristövaikutusluokat. Systeemin rajausta mahdollistaa eri toimintatapojen ja prosessien elinkaarien ympäristövaikutusten vertailun.
2. Inventaarioanalyysi koskee tiedon keruuta ja päästölaskentaa. Vaikutusarvioinnissa käytetään erilaisista luotettavista lähteistä kerättyä tietoa, kuten mittaustuloksista, raporteista, kirjallisuudesta ja asiantuntija-arvioista.
3. Vaikutusarvioinnissa päästöt muutetaan ympäristövaikutuksiksi. Päästöt muutetaan yhteismitallisiksi kunkin tarkasteltavan ympäristövaikutuksen sisällä. Ympäristövaikutuksia voidaan myös normalisoida ja sitä kautta arvottaa ympäristövaikutusten merkittävyys toisiinsa nähden.
4. Tulosten tulkinnassa arvioidaan kerätyt tiedot ja saadut tulokset. Johtopäätökset syntyvät tuloksista, joille on tehty herkkyys-, täydellisyys- ja johdonmukaisuusarviointi.

4.2 Turkiseläinten lannan käsittelyketjujen ympäristövaikutusten arviointi

Elinkaariarvioinnin avulla vertailtiin turkiseläinten lannan nykyisten ja vaihtoehtoisiksi valittujen käsittelymenetelmien ympäristövaikutuksia koko toimintaketju ja muodostuvan lannan elinkaari huomioiden. Elinkaariarvioinnin avulla voidaan havainnollistaa turkiseläinten lannan käsittelyn ympäristövaikutusten kannalta kriittisimpiä vaiheita ja toimia ja auttaa siten ohjaamaan lannankäsittelyä ympäristön kannalta kestävämpiin toimintatapoihin.

Lannan elinkaari alkaa sen muodostumisesta turkiseläinten varjotaloissa, ja päättyy lannan tai siitä saadun tuotteen/jakeen käyttöön lannoitteena ja/tai energianlähteenä. Tarkastelussa huomioitiin varastointiin, käsittelyprosesseihin, kuljetuksiin sekä peltolevitykseen liittyvät ympäristövaikutukset samoin kuin hyvitykset mineraalilannoitteiden ja fossiilisen energian korvaamisesta sekä maaperän hiilivaraston kasvusta.

Tarkastelu keskittyi viiteen vaihtoehtoiseen käsittelyketjuun (Taulukko 6), joista kaksi ensimmäistä kuvasi lannankäsittelyn nykyisiä menetelmiä ja kolme viimeistä uusia vaihtoehtoisia menetelmiä, joiden käyttö turkiseläinten lannalle on vielä vähäistä (biokaasutus) tai sitä ei ole ollenkaan (pyrolyysi).

Taulukko 6. Elinkaariarvioinnissa tarkastellut vaihtoehtoiset lannan käsittelyketjut.

Vaihtoehtoiset tarkastelut LCA:ssa	Lyhenne	Kuvaus
Nykytila 1	N1	Ei prosessointia, lanta suoraan turkistilalta kasvintuotantotiloille lannoitteeksi
Nykytila 2	N2	Lannan keskitetty kompostointi aumoissa ja laitoksissa
Skenaario 1	S1	Lannan biokaasutus ja mädätteen jatkojalostus (separointi + nestejakeen kalvosuodatus)
Skenaario 2	S2	Lannan pyrolyysi
Skenaario 3	S3	Lannan biokaasutus ja mädätteen kuivajakeen pyrolyysi

Elinkaariarviointi toteutettiin SimaPro-ohjelmistolla hyödyntäen siihen kytkettyä Ecoinvent-tietokantaa (Ecoinvent 2020) sekä kirjallisuudesta ja Luonnonvarakeskuksen tutkimuksista (Sarvi ym. 2020, Tampio ym. 2020) saatuja lähtötietoja.

Varsinainen laskennallinen ympäristövaikutusten arviointi rajattiin ilmaston lämpenemiseen. Lisäksi arvioitiin vaihtoehtoisten käsittelyketjujen ammoniakkipäästöt sekä ravinteiden lannoitekäytön muutosten vaikutuksia vesistöjä rehevöittävään fosforikuormitukseen.

Ilmastonmuutokseen vaikuttavina päästöinä tarkasteltiin hiilidioksidia (CO₂), metaania (CH₄) ja dityppioksidia (N₂O). Metaani ja dityppioksidi ovat erityisen voimakkaita kasvihuonekaasuja, sillä niiden ilmakehän lämmitysvaikutukset ovat hiilidioksidiin verrattuna 28- ja 260-kertaiset (IPCC 2014). Vaikutukset yhteismitallistettiin muuntamalla päästöt kyseisillä kertoimilla hiilidioksidiekvivalenteiksi (CO₂ekv). IPCC:n (2006) kasvihuonekaasupäästöjä koskevan laskentatavan mukaisesti kompostoinnissa ja mädätyksessä syntyviä bioperäisiä hiilidioksidipäästöjä ei laskennassa huomioitu.

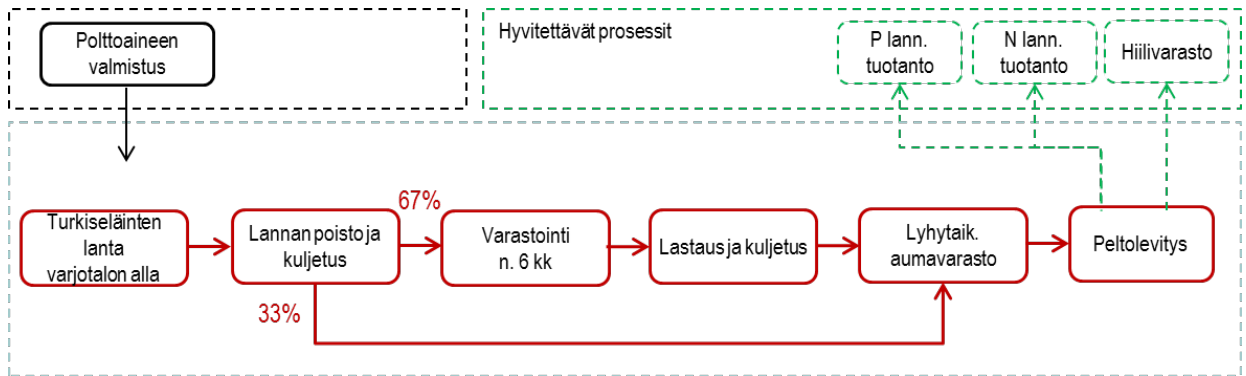
Ilmaan vapautuva ammoniakki vaikuttaa sekä maaperän ja vesien happamoitumiseen että rehevöitymiseen. Lisäksi se aiheuttaa terveydelle haitallisten pienhiukkasten muodostumista ja suurina pitoisuuksina suoria kasvillisuusvaurioita sekä epäedullisia vaikutuksia ihmisten ja tuotantoeläinten terveyteen.

Vesien rehevöitymistä aiheuttaa ammoniakin lisäksi fosforin ja typen huuhtoutuminen pelloilta ja turkistiloilta. Vaihtoehtoisten lannan käsittelyketjujen odotetut myönteiset vesistövaikutukset perustuivatkin siihen oletukseen, että fosforin kuljettaminen pois turkistuotannon alueelta vähentää alueen fosforiylimäärää ja siten fosforilannoitusta sekä pitkällä aikavälillä edelleen peltojen fosforipitoisuutta. Alueelle kohdistuvan vähäisemmän fosforikuormituksen vaikutuksia vesien rehevöitymiseen arvioitiin INCA-mallilla (kappale 4.4.11).

4.3 Tarkasteltujen lannankäsittelyketjujen kuvaukset

4.3.1 Nykytila 1 – Ei prosessointia

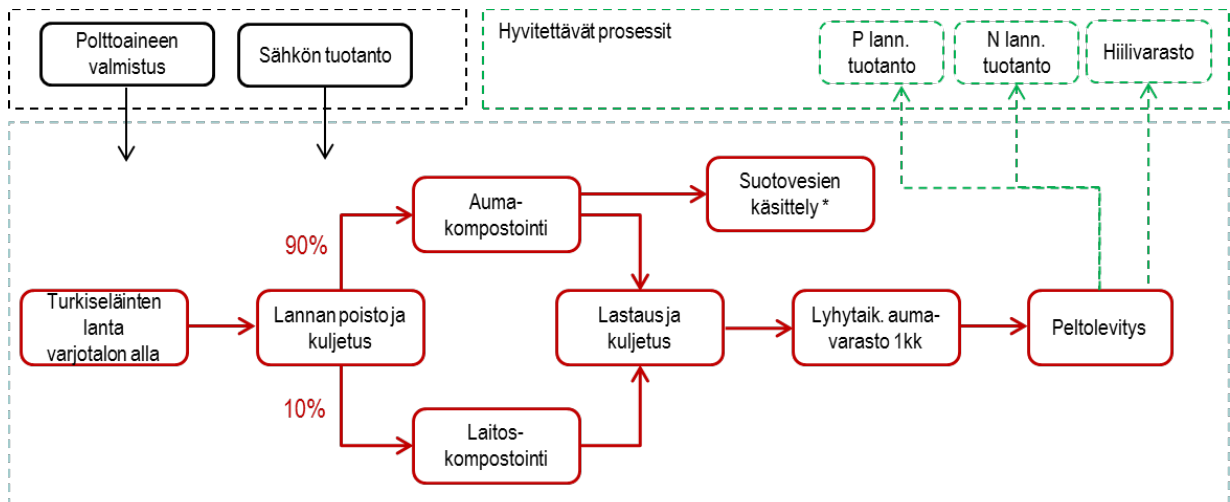
Nykytila 1 (N1) kuvaa nykykäytäntöä, jossa turkiseläinten lantaa ei prosessoida, vaan se kuljetetaan turkistiloilta kasvintuotantotiloille suoraan tai varastoinnin jälkeen levitettäväksi peltoon (Kuva 6). Tarkastelussa 2/3 lannasta varastoidaan ensin tilalla ja tämän jälkeen lyhytaikaisessa aumassa pellolla ja 1/3 lannasta toimitetaan suoraan lannanpoiston jälkeen väliaikaiseen peltoaumaan ennen levitystä.



Kuva 6. Nykytila 1: Lanta varastoinnin kautta peltoon.

4.3.2 Nykytila 2 – Lannan kompostointi

Nykytila 2 (N2) kuvaa nykykäytäntöä, jossa lanta kompostoidaan ennen peltolevitystä (Kuva 7). Kompostoitavasta lannasta 90 % kompostoidaan aumoissa ja 10 % laitoksissa. Valmis komposti kuljetetaan väliaikaisesti peltoaumoihin ennen levitystä.



* Suotovesien osalta huomioidaan ravinteiden poistuma

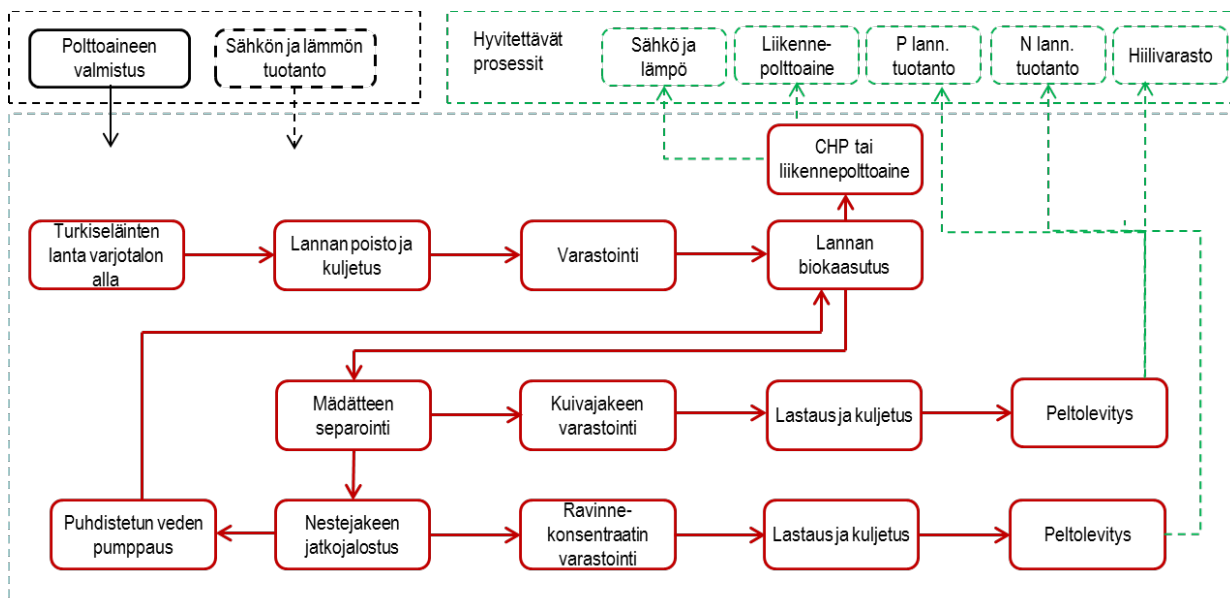
Kuva 7. Nykytila 2: Lanta kompostoinnin kautta peltoon.

4.3.3 Skenaario 1 – Lannan biokaasutus ja mädätteen jatkojalostus

Skenaariossa 1 (S1) lanta poistetaan varjotalojen alta, kuljetetaan ja välivarastoidaan biokaasulaitoksella, missä lannasta tuotetaan biokaasua ja kierrätyslannoitevalmisteita (Kuva 8). Täsmällinen kuvaus toimintaketjusta on esitetty Tampion ym. (2020) raportissa. Prosessissa muodostuva mädäte separoidaan lingolla neste- ja kuivajakeeseen, joista nestejaetta väkevöidään kalvosuodatuksella ravinnekoncentraatiksi. Samalla erottuva vesi kierrätetään takaisin prosessiin syötteen laimentamiseksi märkämädätykseen soveltuvaksi. Kuivajae sekä nestemäinen ravinnekoncentraatti hyödynnetään lannoitteina siten, että niiden kuljetusmatkat pelloille on arvioitu tilanteelle, jossa laitoksen sijoituspaikka on Pedersöre ja levityksessä on huomioitu sitä ympäröivän alueen lantafosforin tarjonta ja peltojen fosforitarve (Tampio ym. 2020).

Muodostuva biokaasu hyödynnetään joko lämmön ja sähkön yhteistuotannossa (CHP) tai liikenne-polttoaineena. Ensimmäisessä tapauksessa mädätykseen tarvittava energia tuotetaan itse biokaasulla ja tästä ylijäävä sähkö ja lämpö myydään hyödynnettäväksi muualla (S1a). Jälkimmäisessä tapauksessa

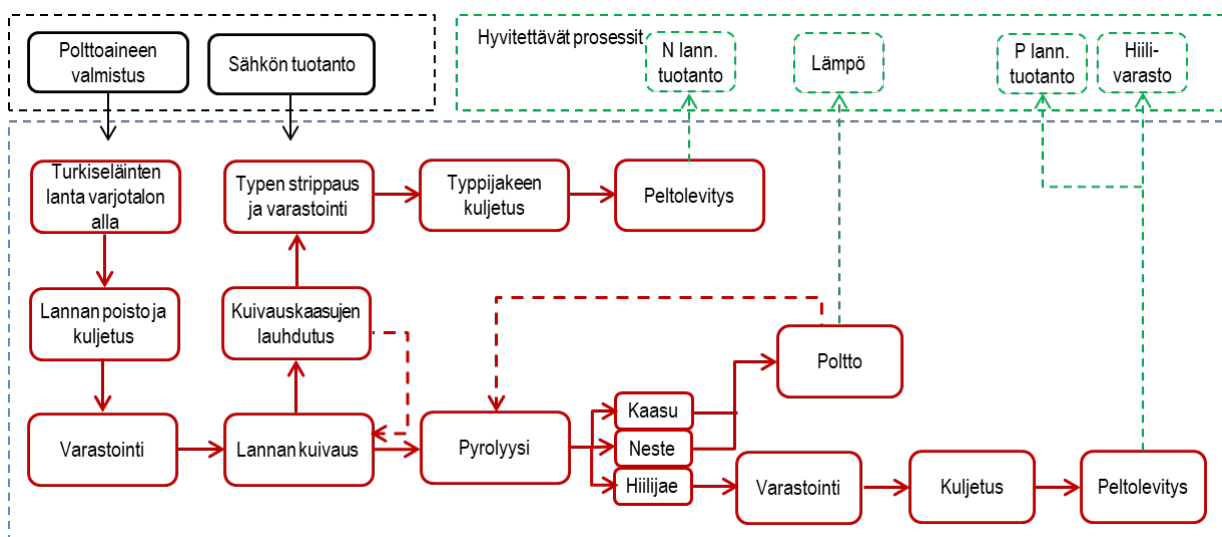
kaikesta tuotetusta biokaasusta tuotetaan liikennepolttoainetta ja laitoksen tarvitsema lämpö ja sähkö ostetaan ulkopuolelta (S1b).



Kuva 8. Skenaario 1: Lannan biokaasutus ja mädätteen jatkojalostus. Biokaasusta tuotetaan joko lämpöä ja sähköä (CHP) tai liikennepolttoainetta.

4.3.4 Skenaario 2 – Lannan pyrolyysi

Skenaariossa 2 (S2) lanta poistetaan varjotalojen alta ja kuljetetaan pyrolyysilaitokselle, missä lantaa välivarastoidaan (n. 1 kk). Sen jälkeen lanta kuivataan, hienonnetaan ja ohjataan pyrolyysiin. Pyrolysoitu hiilijae hyödynnetään lannoitteena ja maanparannusaineena. Pyrolyysineste ja -kaasu poltetaan prosessin tarvitseman lämmön lähteeksi (Kuva 9). Lannan kuivauksen yhteydessä muodostuvista kuivauskaasuista stripataan typpeä ammoniumsulfaatiksi (lannoitevalmiste).

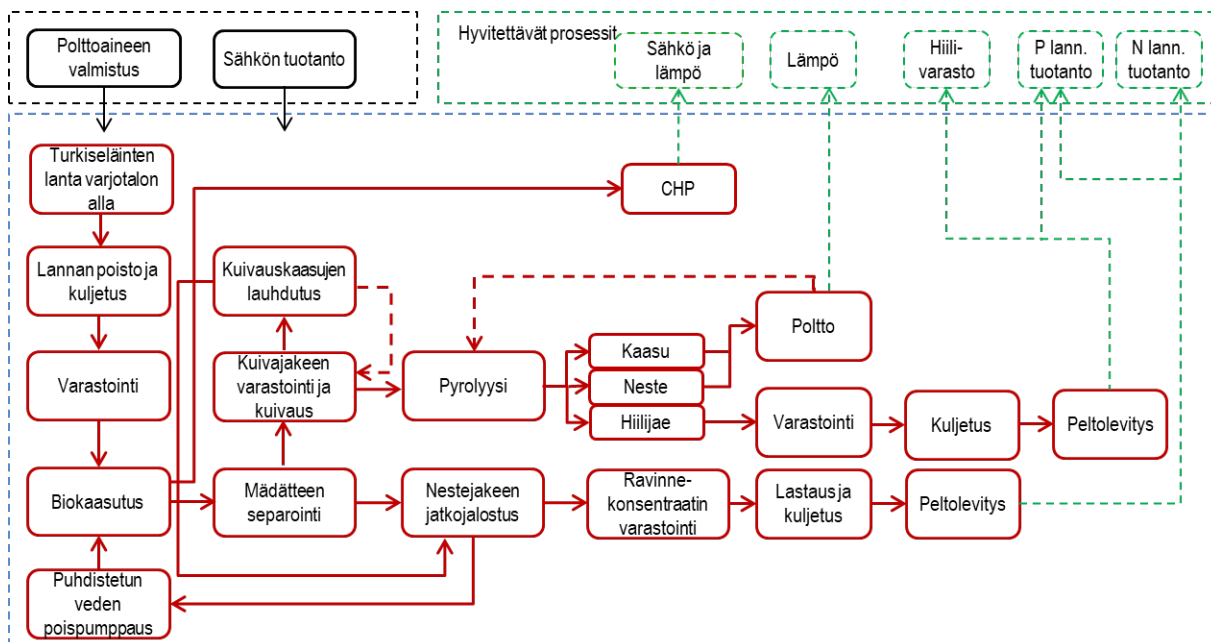


Kuva 9. Skenaario 2: Lannan pyrolysointi, typen talteenotto kuivauskaasuista.

4.3.5 Skenaario 3 – Lannan biokaasutus (BK) ja kuivajakeen pyrolyysi

Skenaariossa 3 (S3) lanta poistetaan varjotalojen alta ja kuljetetaan biokaasulaitokselle välivarastoon. Biokaasuprosessissa muodostuva mädäte separoidaan kuiva- ja nestejakeeksi, joista nestejae jatkojalos-

tetaan ravinnekoncentraatiksi kalvosuodattamalla ja hyödynnetään lannoitteena (kuten S1). Kuivajae kuivataan, tarvittaessa hienonnetaan ja pyrolysoidaan. Hiilijae hyödynnetään lannoitevalmisteenä ja pyrolyysineste ja –kaasu poltetaan prosessin lämmönlähteeksi. Kuivauksen lauhdutuskasut ohjataan nestejakeen kalvosuodatukseen typen talteen ottamiseksi. Mädätyksessä muodostuva biokaasu hyödynnetään lämmön ja sähkön tuotannossa (CHP) biokaasulaitoksen sekä pyrolyysiprosessin energiantarpeeseen (Kuva 10).



Kuva 10. Skenaario 3: Lannan biokaasutus ja kuivajakeen pyrolysointi. Lisäksi lauhdutettujen kuivauskaasujen typen talteenotto.

4.4 Laskentatiedot

Ympäristövaikutusarvioinnissa päästöt suhteutetaan toiminnallista yksikköä kohden, joka tässä tarkastelussa oli tonni varjotalojen alta kerättyä kuivikelantaa. Tarkastelu keskittyi Pedersören ja Uusikaarlepyyn kunnissa muodostuvaan turkiseläinten lantaan.

Lannan ominaisuustiedot perustuvat Suomen normilanta-järjestelmään (Luostarinen ym. 2017b). Lannan ominaisuuksissa on huomioitu tarkastelualueen turkistuotanto siten, että keskimääräiset lannan ominaisuudet on painotettu alueen kettujen (81 %) ja minkkien (19 %) lannan suhteellisilla osuuksilla (Taulukko 7). Turkiseläinten lannan tiheytenä on käytetty arvoa 550 kg/m³. Kuivikkeiden käyttötiedot perustuvat Suomen normilanta -järjestelmässä (Luostarinen ym. 2017b) käytettyä tietoa.

Taulukko 7. Laskennassa käytetyt varjotalojen alta kerätyn turkiseläinten lannan ominaisuudet (Luostarinen ym. 2017b). Lyhenteistä katso Sanasto.

Lanta varjotalon alta	Ntot kg/t	Nsol kg/t	Ptot kg/t	TS kg/t	VS kg/t
Kettu	17,48	8,55	13,64	325,83	252,75
Minkki	20,07	10,93	12,33	322,68	254,09
Painotettu keskiarvo	17,97	9,00	13,39	325,23	253,00

4.4.1 Tarhaus varjotaloissa

Tarkastelussa lanta kerätään varjotalojen alta minkeillä kolme kertaa vuodessa (touko-, elo- ja marraskuu) ja ketuilla kerran vuodessa (elokuu). Näin ollen lantaa varastoidaan varjotalojen alla enintään yhden vuoden ajan.

Varjotalojen alta mahdollisesti kerätyt tai hiekkaan imeytetyt tiivisalustavedet on rajattu tarkastelun ulkopuolelle kuten Suomen normilanta -järjestelmässäkin (Luostarinen ym. 2017b). Varjotalojen väleihin kertyy lisäksi hulevesiä, joihin voi liueta jonkin verran ravinteita lannasta. Tämän ravinnehävikin oletetaan olevan huomioituna riittävällä tarkkuudella Normilannan ominaisuustiedoissa. Hulevedet kerätään ja käsitellään rehevöittävien päästöjen vähentämiseksi, eikä niiden tarkastelua ole sisällytetty tähän arviointiin. Valumavesien yleisimpänä käsittelymenetelmänä on hiekkasuodatus tai kemiallinen käsittely.

4.4.2 Varastointi

Lannan varastointiaikaa määritettäessä huomioitiin lannan poisto- ja levitysjankohdat sekä skenaarioiden kohdalla myös prosessointiyksiköiden syöttökapasiteetti. Prosessoimattoman lannan, kompostituotteiden, pyrolyysin hiilijakeen ja mädätteestä jalostettujen lannoitevalmisteiden varastointia koskevat lähtöoletukset on koottu Taulukkoon 8.

Lannasta, kompostista ja mädätteen kuivajakeesta 70 % levitetään keväällä ja 30 % syksyllä. Nykytilan 1 (N1) laskennassa arvioitiin, että kettujen elokuisen lannanpoiston lannasta 30 % levitetään lyhyen aumavarastoinnin jälkeen syksyllä ja 70 % varastoidaan tilalla ja levitetään seuraavana keväänä. Syksyllä (elo-marraskuu) poistettu minkkien lanta varastoidaan tilalla ja levitetään seuraavana keväänä. Keväällä poistetusta lannasta osa levitetään lyhyen aumavarastoinnin jälkeen peltoon ja osa varastoinnin jälkeen seuraavana syksynä. Turkiseläinten lannan keskimääräinen varastointiajan pituus painotettiin minkkien ja kettujen osuuksilla, jolloin varastointiajaksi saatiin 5,7 kk. Kaksi kolmasosaa lannasta varastoidaan lantaloissa, joista suurin osa (90 %) on avoimia ja loput (10 %) katettuja. Nykytilan 2 (N2) laskennassa oletettiin, että kompostoitavaa lantaa ei varastoida erikseen ennen kompostointia, mutta kompostituote jälkivarastoidaan lyhytaikaisesti peltoaumassa ennen levitystä.

Skenaariossa 1 (S1) mädätykseen menevä lanta sekä mädätteestä separoitu kuivajae oletettiin varastoitavan pressukatteen alla tiivispohjaisella alustalla (1 – 6 kk). Kalvosuodatettu ravinnekonsentraatti varastoidaan umpinaisessa säiliössä. Skenaariossa 2 (S2) pyrolyysiin menevä lanta oletettiin varastoitavan pressukatteen alla (1 – 6 kk). Skenaariossa 3 (S3) lannan varastointi vastaa muutoin skenaariota 1, mutta kuivajakeen varastointiajaksi oletettiin 1 kk ennen pyrolyysiä. Skenaariossa 2 ja 3 pyrolyysin hiilijae varastoidaan ennen kuljetusta peltolevitykseen.

Taulukko 8. Varastointiin liittyvät oletukset tarkastelluissa vaihtoehtoissa.

Vaihtoehto	Vaihe	Varastointitapa	Kesto
N1 Ei prosessointia	Lanta ennen peltolevitystä	1/3 peltoauma 2/3 lantavarasto (avoin 90 %, peltikatettu 10 %) + peltoauma	1 kk 5,7 kk + 1 kk
N2 Kompostointi	Lanta ennen kompostointia Kompostituote aumoista Kompostituote laitoksista	- Peltoauma Peltoauma	0 kk 1 kk 1 kk
S1 Biokaasutus	Lanta ennen mädätystä Mädätyksen kuivajae Ravinnekonsentraatti (neste)	Pressukatettuna tiivispohjaisella alustalla Pressukatettuna tiivispohjaisella alustalla + peltoauma Umpisäiliö	1 – 6 kk 4 kk + 1 kk *
S2 Pyrolyysi	Lanta ennen pyrolyysiä Hiilijae	Pressukatettuna tiivispohjaisella alustalla	1 kk *
S3 Biokaasutus + pyrolyysi	Lanta ennen mädätystä Mädätyksen kuivajae ennen pyrolyysiä Ravinnekonsentraatti (neste) Hiilijae	Pressukatettuna tiivispohjaisella alustalla Pressukatettuna tiivispohjaisella alustalla Umpisäiliö	1 kk 1 kk * *

* Varastoinnista ei oletettu muodostuvan päästöjä ja siten varastoinnin kestoa ei määritetty.

4.4.3 Levitys

Levitystä koskevat lähtötiedot on koottu Taulukkoon 9. Lannasta, kompostituotteista sekä mädätteen kuivajakeesta 60 % levitetään sänkipellolle tai lopetettavalle nurmelle ja 40 % mullokselle. 80 % lannasta ja kompostituotteista muokataan maahan äestämällä tai kevytmuokkauksella ja 20 % kyntämällä. Aika levityksen ja multauksen välillä on 12-24 tuntia. Kalvosuodatettu ravinnekoncentraatti levitetään sijoittamalla keväällä.

Levityksen ympäristövaikutuksiin on sisällytetty lantojen ja lannoitevalmisteiden lastauksen ja levityksen vaatima koneellinen työ ja kalusto. Pyrolyysin hiilijae levitetään muokatuille pelloille ja mullaan levityksen jälkeen.

Taulukko 9. Levitykseen liittyvät oletukset tarkastelluissa vaihtoehdoissa. Prosessoimattomalle lannalle, kompostoidulle lannalle sekä mädätteen kuivajakeelle levityksen lähtötiedot ovat samat.

Vaihtoehto	Lannoitevalmiste	Levityskohde	Levitystapa	Viive multaukseen	Vuodenaika
N1 Ei prosessointia	Prosessoimaton lanta	Mullos 40 % Sänki tai lopetettava nurmi 60 %	Kyntö 20 % Kevyt muokaus 80 %	> 12 h	kevät 70 % syksy 30 %
N2 Kompostointi	Kompostoitu lanta	Mullos 40 % Sänki tai lopetettava nurmi 60 %	Kyntö 20 % Kevyt muokaus 80 %	> 12 h	kevät 70 % syksy 30 %
S1 Biokaasutus	Kuivajae	Mullos 40 % Sänki tai lopetettava nurmi 60 %	Kyntö 20 % Kevyt muokaus 80 %	> 12 h	kevät 70 % syksy 30 %
	Ravinnekoncentraatti (neste)		Sijoituslevitys		kevät 100 %
S2 Pyrolyysi	Hiilijae				
S3 Biokaasutus + pyrolyysi	Hiilijae				
	Ravinnekoncentraatti (neste)		Sijoituslevitys		kevät 100 %

4.4.4 Lannan kaasumaiset päästöt

Lannasta varjotalojen alla, varastoinnin aikana sekä levityksessä vapautuvat ammoniakkipäästöt laskettiin käyttämällä kansainvälisiä päästölaskentaohjeita (EMEP/EEA 2016) ja kansallista laskentamallia (Grönroos ym. 2017).

Typipikaasun (N₂) sekä typpioksidin (NO) päästöjen laskenta perustui myös EMEP/EEA:n (2016) laskentaohjeisiin. Dityppioksidipäästöt (N₂O) ja metaanipäästöt laskettiin IPCC:n Tier 2 -laskentaohjeen mukaisesti (IPCC 2006). Mädätteen kuivajakeen varastoinnille sovellettiin IPCC:n laskentaohjetta Paa-volan ym. (2019b) mukaisesti.

Laskentaohjeiden päästökertoimet NO-, N₂- ja N₂O -päästöille sisältävät sekä eläinsuojassa että varastoinnissa syntyvät päästöt. Päästöt jaettiin lannan viipymääjan suhteessa tarhauksen aikaiselle ja jälkeiselle varastoinnille, jotta lannan varastoinnissa tapahtuneiden muutosten vaikutukset näihin päästöihin voitiin arvioida. Varjotalojen alla varastoidusta lannasta peräisin olevien metaanipäästöjen arvioitiin olevan keskimäärin ketulla puolet ja minkillä, tiheämmän lannanpoiston seurauksena, kolmasosa lannankäsittelylle arvioituista kokonaismetaanipäästöistä.

Mädätteestä erotetun ravinnekoncentraatin varastoinnin oletettiin tapahtuvan suljetussa varastossa, jolloin kaasumaisia päästöjä ei muodostu. Ravinnekoncentraatin levitykselle sovellettiin ammoniakkipäästöjen osalta EMEP/EEA (2016) ja kansallisen laskentamallin (Grönroos ym. 2017) virtsan levityksen kertoimia. Kuivajakeen varastoinnille ja levitykselle käytettiin vastaavia kertoimia kuin lannalle nykytilassa. Hiilijakeesta ei oletettu muodostuvan kaasumaisia päästöjä.

4.4.5 Kuljetukset

Laskentaan käytetyt oletukset kuljetusetäisyyksistä ja -tavoista on koottu Taulukkoon 10. Lantojen ja lannoitevalmisteiden kuljetuksiin käytettyjen maansiirtoautojen päästöt perustuvat VTT:n Lipaston v. 2016 päästötietoihin (VTT 2017). Traktorilla ajon päästöt perustuvat Ecoinvent-tietokantaan (Ecoinvent 2020).

Taulukko 10. Oletetut kuljetusetäisyydet ja käytetyt kuljetusvälineet (yhdensuuntainen matka).

Vaihtoehto	Etäisyys keskimäärin	Vaihteluväli*	Osuudet kuljetusmatkoista	
			Traktori + kärry	Maansiirto-auto
N1 Ei prosessointia				
Lanta varjotalosta varastoon	0,5 km		100 %	
Lanta varastosta peltoon	15 km		80 %	20 %
N2 Aumakompostointi (90%)				
Lanta tilalta kompostointiin	5 km		100 %	
Kompostituote pellolle	30 km		50 %	50 %
N2 Laitoskompostointi (10%)				
Lanta tilalta kompostointiin	10 km		100 %	
Kompostituote pellolle	60 km		20 %	80 %
S1 Biokaasutus				
Lanta tilalta biokaasulaitoksen varastoon	25 km		100 %	
Kuivajae pellolle	100 km	30 – 400 km		100 %
Ravinnekoncentraatti pellolle	15 km			100 % (kontti)
S2 Pyrolyysi				
Lanta tilalta pyrolyysilaitoksen varastoon	25 km		100 %	
Hiilijae pellolle	100 km	30 – 400 km		100 %
S3 Biokaasutus + pyrolyysi				
Lanta tilalta biokaasulaitoksen varastoon, sis. siirto pyrolyysiin	30 km		100 %	
Ravinnekoncentraatti pellolle	15 km			100 % (kontti)
Hiilijaepellolle	100 km	30 – 400 km		100 %

* Vaihteluväli kuvaa herkkyytstarkasteluihin valittujen kuljetusmatkojen vaihtelua. Herkkyytstarkastelut kuvattu tarkemmin kappaleessa 3.4.11.

4.4.6 Kompostointi

Kompostointiin menevästä lannasta 90 % oletettiin kompostoitavan aumoissa ja 10 % laitoksissa. Aumakompostoinnissa lannan ja tukiaineiden seosta kompostoidaan asfalttikentällä aumoissa, joita käännellään pyöräkuormaajalla useita kertoja. Yhdellä hehtaarin suuruisella kompostointikentällä on turkiseläinten lantaa noin 2000 tonnia. Laitoskompostoinnissa laitosvaihe kestää noin 2 – 3 viikkoa, minkä jälkeen massa siirretään ulos aumoihin jälkikypsytykseen. Käytettyjen laitoskompostoinnin päästökertoimien on oletettu kuvaavan koko käsittelyketjua, ml. aumoissa tapahtuva jälkikypsytyks. Lannan massan häviämiseksi arvioitiin aumakompostoinnissa 25 % ja laitoskompostoinnissa 20 %.

Kompostointiprosessin ammoniakkipäästöarvioina käytettiin samoja kertoimia kuin Luken ja SY-KEn toteuttamassa Ravinnelaskurissa (Luostarinen ym. 2019c). Typpikaasun (N₂) päästöinä käytettiin Hennesyn & Erikssonin (2015) tutkimuksen useaan eri kirjallisuuslähteeseen perustuvia päästöjä. Di-typpioksidin suorat ja epäsuorat päästöt on laskettu IPCC:n päästökertoimien avulla. Kompostoinnin ja

sen jälkeisen aumavarastoinnin yhteenlasketut metaanipäästöt arvioitiin olevan vastaavat kuin metaanipäästöt lannan varastoinnissa nykytilassa 1 (N1).

Tukiaineina kompostointiprosesseissa käytetään olkea ja turvetta, joiden osuus on puolet lannan tilavuudesta. Elinkaarilaskennassa huomioitiin tukiaineiden tuotantoketjuun ja niiden kuljetuksiin liittyvät ympäristövaikutukset sekä turpeen hajoamisen hiilidioksidipäästöt (860 kg/t turvetta), mutta ei muita tukiaineiden kompostoinnista aiheutuvia päästöjä (Manninen ym. 2016). Tukiaineiden massahävikit kompostoinnin aikana oletettiin olevan samat kuin lannalla. Tukiaineiden kuljetukset kompostiin sisällytettiin elinkaarilaskennassa kompostointiprosessiin. Kompostoinnin laskennassa on huomioitu myös massan työstämiseen tarvittavan pyöräkuormaajan työ ja elinkaarivaikutukset; päästöt arvioitiin VTT:n Lipaston päästötietojen perusteella (VTT 2017). Kompostoinnin lähtötietoja on koottu Taulukkoon 11.

Taulukko 11. Kompostoinnin lähtötietoja.

		Aumakompostointi	Laitoskompostointi
Prosessin energiankulutus / tonni lantaa	Sähkönkulutus	0 kWh	1,72 kWh
	Polttoaineen kulutus	0,5 l	0,25 l
Tukiaineiden tilavuusosuudet	Olki	80 %	10 %
	Turve	20 %	90 %
Tukiaineita / tonni lantaa	Olki	43,6 kg	5,5 kg
	Turve	24,2 kg	109,1 kg
Tukiaineiden tilavuuspaino (Kapuinen 1993)	Olki	90 kg/m ³	90 kg/m ³
	Turve	200 kg/m ³	200 kg/m ³
Tukiaineiden kuljetusmatkat kompostille	Olki	10 km	10 km
	Turve	40 km	40 km

Kompostoitava lanta altistuu aumakompostoinnin olosuhteissa ulkona mm. sateelle, jolloin muodostuu suotovesiä, joiden mukana aumoista voi huuhtoutua ravinteita. Suotovesiä arvioitiin muodostuvan puolet sadannan keskimääräisestä määrästä eli 1000 m³/ha. Huuhtoumat laitoskompostin jälkikypsytyksaumoista arvioitiin niin vähäisiksi, että ne rajattiin tarkastelun ulkopuolelle. Sen sijaan aumakompostoinnin suotovesien ravinnepitoisuuksia ja ympäristövaikutuksia arvioitiin turkiseläinten lantaa aumakompostoilta kentältä otettujen vesinäytteiden pohjalta (Taulukko 12). Ympäristöön kohdistuvan ravinnekuormituksen vähentämiseksi aumakompostikentän suotovedet oletetaan ohjattavan painovoimaisesti hiekkasuodattimeen. Hiekkasuodattimen arvioitiin puhdistavan suotoveden tyydestä 30 %, fosforista 70 % ja orgaanisesta aineksestä 80 % ympäristönsuojelulain 527/2014 mukaisesti.

Taulukko 12. Suotovesien laskennalliset ominaisuudet lantatonnia kohden aumakompostikentällä ennen maasuodatusta ja suodatuksen jälkeen. Lyhenteistä katso Sanasto.

Ominaisuudet	Ennen suodatusta	Suodatuksen jälkeen
Tulevan jäteveden määrä (l/t lantaa)	500	
N _{tot} (g/t lantaa)	95	67
P _{tot} (g/t lantaa)	70	21
BOD ₇ /org. aines (g/t lantaa)	265	53
pH	8,4	

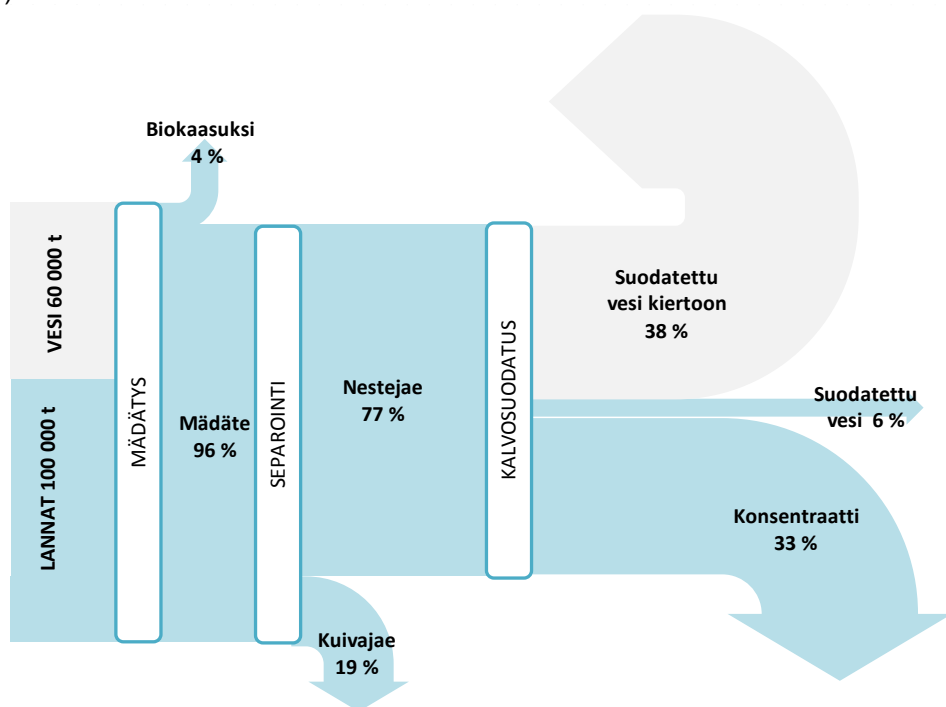
4.4.7 Biokaasutus

Oletuksena on, että turkiseläinten lantaa käsitellään keskitetyssä käsittelylaitoksessa yhtäaikaaisesti muiden lantojen kanssa, kuten kuvattu Tampion ym. (2020) raportissa. Laitoksen kokonaiskäsittelykapasiteetti on 100 000 t/a. Turkiseläinten lantaa on prosessissa yhteensä 50 000 tonnia, muu osa (50 000 t) on

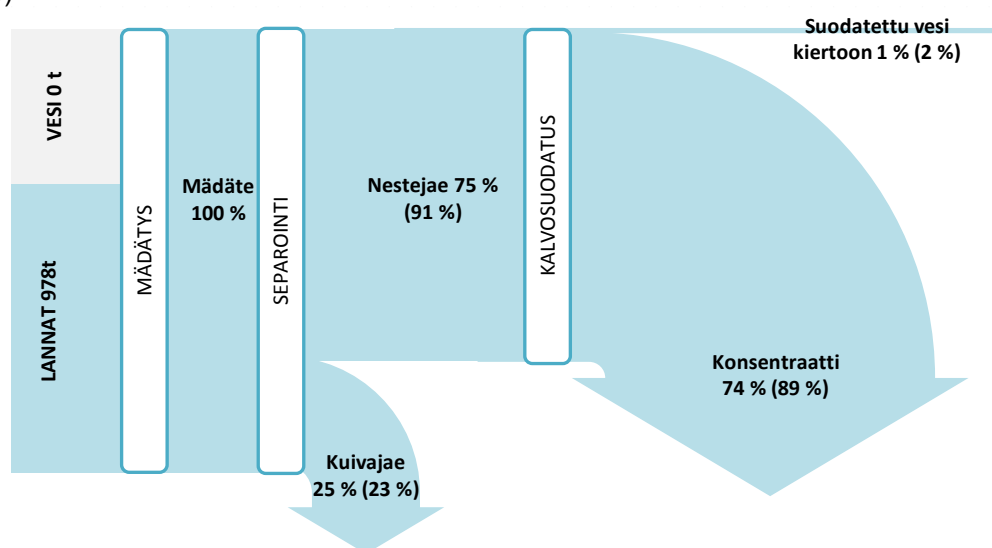
naudan ja sian lietalantaa. Turkiseläinten lannasta laskennallisesti muodostuvan metaanin osuus biokaasussa on noin 1 591 t.

Biokaasulaitos perustuu märkämädätykseen, jossa syötteen kuiva-ainepitoisuus on tyypillisesti alle 15 %. Koska syötteestä puolet on kuiva-ainepitoisuuden turkiseläinten lantaa, tarvitaan lietalantaa sekä mädätteen jatkojalostuksesta kierrätettävää vettä (kalvosuodatuksesta) laimentamaan syöte prosessille sopivaksi. Biokaasuprosessin jälkeen mädäte separoidaan lingolla kuiva- ja nestejakeisiin (Kuva 11) ja nestejake ohjataan kalvosuodatukseseen. Erotettu vesi siis ohjataan takaisin prosessin alkuun ja muodostuva typpipitoinen ravinnekonstraatti varastoidaan odottamaan levitystä peltoon. Fosforipitoinen kuivajake varastoidaan odottamaan levitystä (S1) tai ohjataan pyrolyysiin (S3).

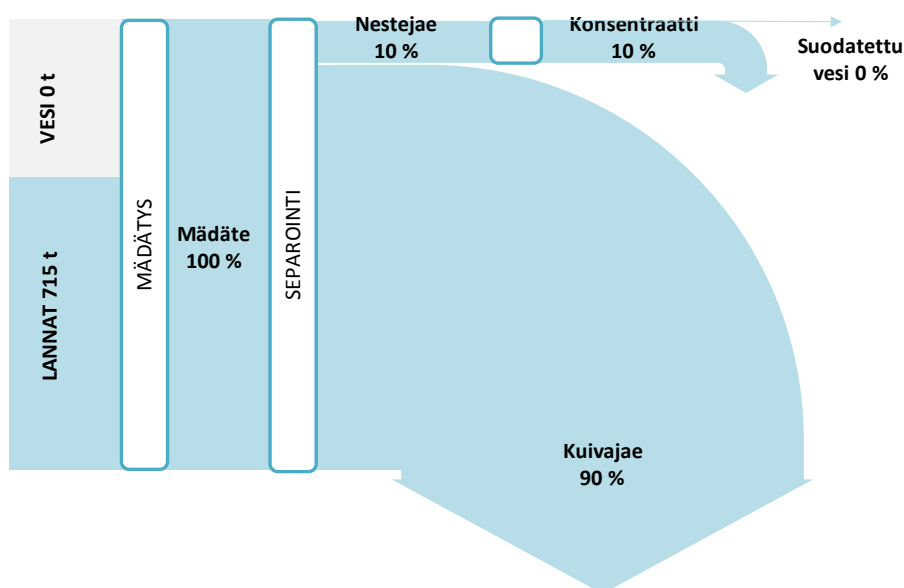
a)



b)



c)



Kuva 11. Massan, typen ja fosforin jakautuminen biokaasutusprosessissa. a) Syötemateriaalien ja prosessin laimennukseen käytetyn veden massan jakautuminen käsittelyprosessissa. b) Syötemateriaalien sisältämän typen (ammoniumtyyppi suluissa) jakautuminen käsittelyprosessissa. c) Syötemateriaalien sisältämän fosforin jakautuminen käsittelyprosessissa. Mädätteen prosessoinnin aikana ravinteista tyyppi siirtyy linkoseparoinnin myötä pääosin nestejakeeseen ja edelleen nestejakeen kalvokäsittelyssä muodostuvaan ravinnekonsentraattiin. Fosfori on separoinnin jälkeen 90 %:sti kuivajakeessa. (Tampio ym. 2020).

Biokaasulaitoksen oma sähkönkulutus on biokaasun hyödyntämisratkaisusta riippuen 87 – 108 kWh/t ja lämmönkulutus 83 kWh/t, kuten esitetty Tampion ym. (2020) raportissa. Skenaariossa 1a biokaasusta tuotettiin sähköä ja lämpöä (laitoksen oma käyttö + myynti), kun taas skenaariossa 1b kaikki biokaasu jalostettiin liikennepolttoaineeksi ja laitoksen tarvitsema lämpö tuotettiin hakkeella ja sähkö ostettiin verkosta. Laitos kulutti tuottamastaan lämmöstä noin kolmanneksen ja sähköstä vajaan puolet (S1a), jolloin myyntiin päätyi 100 – 118 kWh/t sähköä ja 153 – 182 kWh/t lämpöä riippuen lannan esivarastointiajasta ennen mädätystä (6 kk tai 1 kk). Ero johtuu lannan varastoinnin aikana oletetusta orgaanisen aineksen hajoamisesta. Liikennepolttoaineen tuotannossa biokaasulla voidaan korvata bensiiniä 42 – 54 l/t.

Mädätyksen yhteydessä pieni osa metaanista karkaa mm. varoventtiilien, venttiilivuotojen ja huoltojen yhteydessä aiheuttaen sekä jatkuvia että satunnaisia metaanipäästöjä. Yksiselitteistä arviota biokaasulaitoksen metaanipäästöille ei ole, koska päästöihin vaikuttavat monet laitoksen rakenteisiin, tekniikkaan ja huoltoon liittyvät seikat eivätkä kirjallisuudessa esiintyvät arvot ole useinkaan metodologisista syistä vertailukelpoisia (Murphy 2017). Laskennassa oletettiin, että metaanihävikki laitoksella on 2 % syntyvästä metaanista (mm. Rindbøl ym. 2007 arvioi 1-3 %).

4.4.8 Pyrolyysi

Turkiseläinten lantaa voidaan prosessoida keskitetyssä pyrolyysilaitoksessa. Lanta ensin kuivataan ja homogenoidaan ja sitten se ohjataan pyrolyysiin. Varjotalojen alta poistetun turkiseläinten lannan kuiva-ainepitoisuus on noin 30 %. Pyrolyysiin ohjattavan massan kuiva-ainepitoisuuden tulisi olla yli 70 % (Tripathi 2016). Suurempi kosteuspitoisuus tuottaa enemmän pyrolyysinestettä hiilijakeen sijaan (Demirbas 2004) ja lisää pyrolyysin energiantarvetta. Kuiva-ainepitoisuus tulisi saada kuivaamalla tai kuivikkeen avulla noin 90 %:iin (Ro ym. 2010, Mirkouei ym. 2017, Onarheim ym. 2014).

Laskennassa oletettiin, että lanta kuivataan 94 %:n kuiva-ainepitoisuuteen 60 asteen lämpötilassa (Sarvi ym. 2020), jolloin päästöjen muodostuminen on vielä vähäistä (Spets & Ahtila 2004). Kuivauk-

sen aikana lannan orgaanisesta tyydestä oletettiin haihtuvan 19,5 % typen oksideina ja 15,1 % ammoniumtyyppinä (Ghaly & Alhattab 2013).

Osa kuivauksessa menetetystä tyydestä voidaan ottaa lauhteesta talteen happopesurilla. Pesuritekniologialla on mahdollista väkevoidä ammoniumtyyppi pienempään nestetilavuuteen, mikä edistää ravinteiden kierrätystä alentamalla varastointikapasiteetin tarvetta ja vähentää kuljetettavia nestemääriä. Kuivauksessa haihtuvasta ammoniumtyydestä oletettiin saatavan talteen 90 % (ammoniumtyypin erotustehokkuus 84 – 95 %, Ervasti ym. 2018).

Kuivauksessa kuluu sähköenergiaa esimerkiksi kuljettimien, syöttölaitteiden ja puhaltimien toimintaan (Viita 2013) sekä lämpöenergiaa itse lämmitysprosessiin. Kuivattavan massan pintajännityksen vuoksi kuivaukseen kuluu nesteen latenttilämpöä enemmän energiaa. Itse pyrolyysiprosessi kuluttaa energiaa kirjallisuuden perusteella 1,8 – 2,5 MJ tuotettua hiilijae-kilogrammaa kohti (mm. Ro ym. 2010, Bals ym. 2012). Käytetyt arvot kuivauksen ja pyrolyysin tarvitsemalle lämpöenergialle laskettiin Taulukossa 13 esitettyjen kaavojen avulla. Lämpöhäviöksi oletettiin 5 % (Liu & Li 2014). Lisäksi lauhdutuslämpö voidaan hyödyntää kuivauksessa lämmönvaihtimen tai lämpöpumpun avulla, jolloin kuivauksen lämmitysenergian tarve vähenee 15-25 % (Viita 2013). Laskennassa käytettiin arvoa 15 %.

Taulukko 13. Kuivauksen ja pyrolyysin lämpöenergian laskentakaavat (Liu & Li 2014, Cunningham ym. 2016).

$Q_{H_2O} = C_{H_2O(l)} (\Delta T_{H_2O(l)}) + R_{H_2O} + C_{H_2O(g)} (\Delta T_{H_2O(g)})$	
missä	
Q_{H_2O}	veden lämmitykseen tarvittava lämpöenergia (MJ)
$C_{H_2O(l)}$	veden lämpökapasiteetti = 0,0042 MJ/kg°C
$\Delta T_{H_2O(l)}$	lämpötilaero 25 °C → 100 °C (lannan sisältämän veden lämmittäminen kiehumispisteeseen)
R_{H_2O}	veden höyrystymislämpö = 2,26 MJ/kg
$C_{H_2O(g)}$	vesihöyryn lämpökapasiteetti = 0,0042 MJ/kg°C
$\Delta T_{H_2O(g)}$	lämpötilaero 100 °C → 450 °C (vesihöyryn lämmittäminen pyrolyysilämpötilaan)
$Q_{DM} = C_{DM} (\Delta T_{DM})$	
missä	
Q_{DM}	kuiva-aineen lämmitykseen tarvittava lämpöenergia (MJ)
C_{DM}	kuiva-aineen lämpökapasiteetti = 0,0012 MJ/ kg°C
ΔT_{DM}	lämpötilaero 25 °C → 450 °C (lannan kuiva-aineen lämmittäminen pyrolyysilämpötilaan)
$Q_{total} = Q_{H_2O} + Q_{DM} + Q_{häviö}$	

Tarvittava lämpöenergia turkiseläinten lannan kuivaukseen ja homogenointiin oletettiin laskennassa saatavan kuivauskaasujen lauhdutuksesta sekä pyrolyysikaasun ja -nesteen poltosta. Pyrolyysikaasusta saatavan lämpöenergian hyötysuhteena käytettiin 95 %:a (Leikas 2015). Koska pyrolyysikaasun polton päästöistä on vähän tutkimustietoa saatavilla, oletettiin päästöjen vastaavan maakaasun polttoa (SYKE:n FRES-malli, Karvosenoja 2018). Pyrolyysineste oletettiin hyödynnettävän 90 % hyötysuhteella (Motiva 2013) ja poltosta syntyvien päästöjen arvioinnissa käytettiin kevyen sekä raskaan polttoöljyn poltosta syntyvien päästötietojen keskiarvoa (Wissmiller 2009, Lehto ym. 2013).

Energiataselaskennassa (Taulukko 14) hyödynnettiin edellisessä kappaleessa mainittujen tietojen lisäksi Lukessa tehtyjen pyrolyysikokeiden tuloksia (Sarvi ym. 2020) sekä kirjallisuudesta saatuja arvoja.

Pyrolyysikokeiden tulosten oletettiin edustavan lantaa, jota on varastoitu 6 kk ennen pyrolysointia. Lyhyemmälle 1 kk:n varastoinnille arvot laskettiin suhteuttamalla kokeelliset tulokset syötteen orgaanisen aineksen (VS) määrään. Lyhyemmällä varastoinnilla syötteen orgaanisen aineksen määrä oli laskennallisesti n. 12 % suurempi, joten myös saannot oletettiin tämän verran suuremmiksi. Turkislannan pyrolyysituotteiden keskimääräiset saannot sekä niiden ominaisuudet (Taulukko 15) laskettiin pyrolyysikokeiden (Sarvi ym. 2020) perusteella alueella muodostuvien turkiseläinten lantojen suhteessa (minkki 81 %, kettu 19 %).

Taulukko 14. Turkiseläinten lannan pyrolyysin energiatase (S2). Vaihtoehdot 1kk/6 kk viittaavat lannan varastointiaikaan ennen pyrolyysiä.

Osaprosessi	S2 Pyrolyysi (MJ)		Viite
	1 kk	6 kk	
Lämpö			
Prosessi (Q_{total})	-3 037	-3 023	Liu & Li 2014, Cunningham
Lauhdutuslämpö	261	261	15-25 % (Viita 2013)
Kaasun poltto	264	296	Ks. taulukko 14
Nesteen poltto	2 672	2 999	Ks. taulukko 14
Netto	159	533	
Sähkö			
Kuivaus	-194	-194	-0,29 MJ/kg haihdutettua vettä
Pyrolyysi	-299	-336	-1,8 MJ/kg hiiltä (Ro ym. 2010)
Kuivauskaasun strippaus ja pesu	-72	-72	-0,11 MJ/l (Ervasti ym. 2018)
Netto	-565	-602	

Taulukko 15. Turkiseläinten lannan pyrolyysituotteiden keskimääräiset ominaisuudet (S2) toiminnallista yksikköä kohden (= tonni varjotalojen alta kerättyä kuivikelantaa). Vaihtoehdot 1kk/6 kk viittaavat lannan varastointiaikaan ennen pyrolyysiä.

	S2 Pyrolyysi		Viite
	1 kk	6 kk	
Saannot			
Pyrolyysineste (kg/t)	112,9	100,6	Sarvi ym. 2020
Kaasu (m ³ /t)	26,0	23,1	Sarvi ym. 2020
Pyrolysoitu lanta(kg/t)	186,6	166,8	Sarvi ym. 2020
Pyrolysoidun lannan hiili (kg C/t)	51,2	45,8	Sarvi ym. 2020
Pyrolysoidun lannan fosfori (kg P/t)	15,0	13,4	Sarvi ym. 2020
Pyrolysoidun lannan liukoinen fosfori (kg P _{liuk} /t)	1,3	1,2	Sarvi ym. 2020
Energiasisällöt			
Pyrolyysineste (MJ/kg)	29,5	29,5	Sarvi ym. 2020
Pyrolyysikaasu (MJ/m ³)	12,5	12,5	Monlau ym. 2015, Laitinen 2015, Fassinou ym. 2009

4.4.9 Biokaasutus ja pyrolyysi

Turkiseläinten lannan mädätteen separoinnin kuivajaetta voidaan jatkojalostaa pyrolysoimalla. Laskennassa hyödynnettiin samoja oletuksia kuin edellisissä kappaleissa on esitetty. Kuivajakeen pyrolysoinnin saannot ja pyrolyysituotteiden ominaisuudet arvioitiin suhteuttamalla ne kokeellisten tulosten (Sarvi ym. 2020) syötteen orgaanisen aineksen osuuteen (ks ed. luku). Energiataseen laskenta sekä pyrolyysituotteiden laskennalliset keskimääräiset saannot ja ominaisuudet on esitetty taulukoissa 16 – 17. Mä-

dätyksessä muodostuvaa sähköä ja lämpöä oletettiin hyödynnettävän mädätyksen lisäksi myös pyrolyysiprosessissa.

Taulukko 16. Mädätteestä separoidun kuivajakeen pyrolyysin energiatase (S3). Vaihtoehdot 1kk/6 kk viittaavat lannan varastointiaikaan ennen mädätystä.

Osaprosessi	S3 Mädätys + Pyrolyysi (MJ)		Viite
	1 kk	6 kk	
Lämpö			
Prosessi (Q_{total})	-1 133	-1 190	Liu & Li 2014, Cunningham ym. 2016
Lauhdutuslämpö	94	100	15 – 25 % (Viita 2013)
Kaasun poltto	162	146	Ks. taulukko 16
Nesteen poltto	1 644	1 483	Ks. taulukko 16
Netto	768	540	
Sähkö			
Kuivaus	-70	-75	-0,29 MJ/kg haihdutettua vettä (Viita 2013)
Pyrolyysi	-184	-166	-1,8 MJ/kg hiiltä (Ro ym. 2010)
Kuivauskaasun UF + RO	-17	-17	-0,11 MJ/l (Ervasti ym. 2018)
Mädätyksen ylijäämä sähkö	118	100	
Netto	-158	-153	

Taulukko 17. Mädätteestä separoidun kuivajakeen pyrolyysituotteiden keskimääräiset ominaisuudet (S3) toiminnallista yksikköä kohden (= tonni varjotalojen alta kerättyä kuivikelantaa). Vaihtoehdot 1kk/6 kk viittaavat lannan varastointiaikaan ennen mädätystä.

	S3 Mädätys + Pyrolyysi		Viite
	1 kk	6 kk	
Saannot			
Pyrolyysineste (kg/t)	61,9	55,8	Sarvi ym. 2020
Kaasu (m ³ /t)	14,2	12,8	Sarvi ym. 2020
Pyrolysoitu lanta(kg/t)	102,3	92,3	Sarvi ym. 2020
Pyrolysoitun lannanhiili (kg C/t)	28,1	25,3	Sarvi ym. 2020
Pyrolysoitun lannan fosfori (kg P/t)	8,2	7,4	Sarvi ym. 2020
Pyrolysoitun lannan liukoinen fosfori (kg P _{liuk} /t)	0,7	0,6	Sarvi ym. 2020
Energiasisällöt			
Pyrolyysineste (MJ/kg)	29,5	29,5	Sarvi ym. 2020
Pyrolyysikaasu (MJ/m ³)	12,5	12,5	Monlau ym. 2015, Laitinen 2015, Fassinou ym. 2009

4.4.10 Hyvitetyt päästöt

Lannan, kompostituotteiden ja tarkasteltujen biokaasulaitoksen ja pyrolyysin lannoitevalmisteiden peltolevityksellä voidaan vähentää mineraalilannoitteiden käyttöä, jolloin vältetään niiden valmistuksesta ja käytöstä aiheutuvia ympäristövaikutuksia, eli muodostuu hyvitettäviä päästöjä. Lannasta peltoon päätyvän liukoisen typen katsotaan vähentävän mineraalityppilannoitteen käyttöä, jolloin laskennassa korvataan mineraalilannoitteen valmistuksen ja käytön päästöjä. Sen sijaan nykytilan tarkastelussa hyvitetään laskennassa vain 30 % levitettävän lannan tai kompostoituotteiden sisältämästä fosforista, koska osalla tarkasteltavan alueen pelloista on jo valmiiksi korkea fosforipitoisuus eikä fosforilannoitus tuota satoa. Hyvitysprosentti perustuu Ravinnelaskurilla (Luostarinen ym. 2019c) tehtyyn tarkasteluun.

fosforilannoitustarpeesta, kun huomioidaan tarkastelualueen tuotettavien kasvien fosforilannoitustarve ja peltojen viljavuusluokka. Turkiseläinten lannan fosforin käyttökelpoisuutena on käytetty ympäristökorvauksen mukaista 60 %:ia. Skenaarioissa S1 – S3 kuivajaetta ja pyrolysoitua lantaa hyödynnettäessä oletuksena on, että fosforipitoiset jakeet siirretään kokonaisuudessaan alueille, missä lantaperäinen fosfori voi korvata mineraalifosforilannoitteen käyttöä täysimääräisesti.

Ammoniakkipäästöjä ei laskennassa hyvitetä, koska mineraalilannoitteiden levitys oletetaan tehtävän sijoituslannoituksena, jolloin ammoniakkipäästöjä ei katsota muodostuvan.

Biokaasuprosessissa muodostuvan biokaasun oletetaan korvaavan sähkön ja lämmön tuotannossa Suomen keskimääräistä verkkosähköä ja Pedersören ja Uusikaarlepyyn alueen lämmöntuotantoa, joka koostuu 99 % hakkeesta ja 1 % kevyestä polttoöljystä. Hakkeen polton ilmastovaikutus ja sille asetettava päästökerroin riippuvat hakkeen alkuperästä. Risuista ja hakkuutähteistä tuotettua haketta poltettaessa ilmastovaikutus on pienempi kuin runkopuun polttamisella (Soimakallio 2018, Helin ym. 2016, Pingou ym. 2011). Laskennassa käytettiin arviota suomalaisesta keskimääräisestä hakkeesta (Soimakallio 2018). Biokaasun hyödyntäminen liikennepolttoaineena vähentää vastaavasti fossiilisten polttoaineiden käyttöä.

Lannassa on sekä nopeasti että hitaasti hajoavia hiiliyhdisteitä. Niiden määrä ja suhteet muuttuvat, kun lantaa prosessoidaan. Pääsääntöisesti voidaan sanoa, että mädätyksen ja kompostoinnin aikana nopeasti hajoava hiili vapautuu hiilidioksidina ja metaanina. Jäljelle jäävä pysyvämpi osa hiilestä säilyy kompostimassassa ja mädätteessä. Laskennassa arvioitiin, miten pysyvän hiilen osuudet muuttuvat lantaa prosessoitaessa. Lisäksi hyödynnettiin humustumiskertoimia, jotka kuvaavat sitä osuutta hiilestä, mikä päättyy pysyväksi osaksi maaperän hiilivarastoa. Humustuvasta osuudesta hiiltä hajoaa noin 1 % vuosivauhdilla (Heinonsalo 2020). Humustumiskertoimena käytettiin lannalle 35 % sekä mädätteelle ja kompostille 40 % (Jimenez ym. 2015). Pyrolysoidun lannan hajoaminen maaperässä on hitaampaa ja noin 20 % siitä oletetaan hajoavan sadan vuoden aikana pysyvän osan ollessa siten 80 % (Lehman ym. 2009, Baldock ym. 2002, Roberts ym. 2010). Humustumaton osa hiilestä hajoaa noin viiden vuoden sisällä (Roberts ym. 2010). Laskennallisesti voidaan olettaa, että jos pellon hiilivarastot kasvavat sinne lisätyn hiilipitoisen lannoitevalmisteen seurauksena, voidaan välttää sidotun hiilen verran hiilidioksidipäästöjä.

4.4.11 Rehevöityminen

Alueellisen lannan prosessoinnin vaikutuksia vesistöjä rehevöittävien fosforipäästöjen muutokseen tutkittiin INCA-mallilla (Wade ym. 2002, Whitehead ym. 1998). INCA (Integrated Nutrients from Catchments) on Readingin yliopistossa, Englannissa, kehitetty dynaaminen ja prosessipohjainen valuma-aluemalli. Malliperhe sisältää tyyppiä lisäksi osamallit eroosion ja sedimenttien kulkeutumisen, fosforin, orgaanisen hiilen, kloridin, elohopean ja muiden haitallisten aineiden, sekä taudinaiheuttajien laskentaan.

Maaperässä tapahtuvat prosessit lasketaan keskenään samanlaisissa segmenteissä (Hydrologically Representative Unit, HRU). Malli laskee valunnan maan pinnasta, aktiivisesta maaperäkerroksesta sekä pohjavesivarastosta vastaanottavaan vesistöön, sekä kulkeutumis- ja muutosprosessit vesistössä. Suomen ympäristökeskuksessa on kehitetty mallin soveltuvuutta pohjoisiin oloihin lisäämällä malliin lumiosio ja parantamalla maaperän lämpötilan laskentaa. Fosforin reaktiot perustuvat tasapainomalliin, joten se ottaa huomioon maaperään sitoutunutta fosforia indikoivan P-luvun vaikutuksen rehevöittävään liukoisen fosforin huuhtoutumiseen.

Mallilla voidaan tutkia sateiden ja lämpötilan vaihteluja sekä kuormituksen muutoksia (esimerkiksi lannan levitysmäärien vaikutuksia). Mallilla voidaan arvioida mm. ilmastonmuutoksen, väestönkasvun ja maankäytön muutosten vaikutuksia vesistökuormitukseen.

Rehevöitymistarkastelun lähtökohtana oli alueellinen biokaasulaitos, johon ohjataan turkiseläinten lannan lisäksi myös 50 000 t naudaa ja sian lietalantaa. Laitoksen sijoituspaikaksi valittiin Pohjanmaa ja täsmällisemmin Uudenkaarlepyyn ja Pedersören kuntien alue. Laitokseen ohjattiin 89 % alueen turkis-

eläinten lannoista, 29 % kaikesta kuntien alueella muodostuvasta lannasta ja 66 % alueen lantafosforista, kaikki saatavilla 25 km säteellä laitoksesta (Tampio ym. 2020). Laitoksessa muodostuva fosforipitoisen lannoitevalmiste (mädätteestä separoitu kuivajae) kuljetetaan hyödynnettäväksi alueella, jossa fosforilannoitusta tarvitaan.

INCA-mallilla arvioitiin alueella muodostuvan lannan peltolevityksestä aiheutuva liukoinen fosforikuormitus Lapuanjoen valuma-alueelta Itämereen vesistöön. Lähtötietona käytettiin Normilanta-järjestelmällä laskettuja valuma-alueen kunnittaisia lannan ravinnemääriä sekä nykytilassa että vaihtoehtoisessa tilanteessa (Ravinnelaskuri 2019) (Taulukko 18). Nykytilassa usean kunnan alueella syntyy niin paljon lantaa, että sen sisältämä fosfori peltoalaa kohden ylittää voimassa olevan ympäristökorvausjärjestelmän mukaiset lannoitusrajat. Vaihtoehtoisessa tilanteessa oletettiin, että biokaasulaitoksessa muodostuva lannoitevalmiste kyettiin levittämään tasaisemmin alueen sisällä, ja osa siitä kuljettamaan alueelta pois, joten alueelle jää levitettäväksi lantafosforia vain ympäristökorvausjärjestelmän sallima määrä. Lisäksi lannoitus oletettiin tehtävän keväällä. Lannoitusmäärien tasaantuminen johtaa vähitellen korkeimpien P-lukujen laskuun ja liukoisen fosforin huuhtouman vähenemiseen.

Taulukko 18. Lapuanjoen alueen kunnissa syntyvä lantafosfori.

Alue	Lannoitus P (kg)	Lannat P (kg)	Yli- /alijäämä P (kg)	Lannoitus P (kg / ha)	Lannat P (kg / ha)	Yli- /alijäämä P (kg / ha)	P-luku kunnassa keskimäärin (mg/l)
Alajärvi	82018	142567	60549	8	13	6	13.6
Alavus	84525	129886	45361	8	13	5	12.4
Isokyrö	73932	92722	18790	7	9	2	13.4
Kauhava	262726	434323	171597	8	14	5	14.7
Kuortane	40130	75009	34880	7	12	6	13.1
Lappajärvi	35066	195687	160621	7	39	32	18.1
Lapua	144084	172886	28802	8	10	2	13.5
Pedersöre	125297	360191	234894	9	26	17	15.7
Seinäjoki	259798	438218	178420	9	16	6	11.4
Uusikaarlepyy	73025	717747	644722	6	58	52	32.2
Virrat	72634	56362	-16272	10	8	-2	10.7
Vöyri	110629	340127	229498	8	25	17	16.1
Ähtäri	37407	37561	153	10	10	0	10.7

4.4.12 Laskennan epävarmuudet ja herkkyystarkastelut

Elinkaariarvioinnin tuloksen tarkkuus riippuu käytetyn lähtöaineiston tarkkuudesta. Herkkyystarkastelussa voidaan siten tarkastella tekijöitä, joihin kohdistuu merkittävä epävarmuus, tai joiden vaikutus kokonaistulokseen on huomattava. Lannankäsittelyketjut ovat monivaiheisia ja eri vaiheisiin kohdistuvilla herkkyystarkasteluilla pyritään osoittamaan ketjun hyvän hallinnan merkitys lopputulokseen.

Lannan pyrolyysi on kansainvälisestikin verrattain uutta tekniikkaa eikä Suomessa ole vielä yhtään toiminnassa olevaa lannan pyrolyysilaitosta. Laskennassa käytetty aineisto perustuu siten pitkälti kirjallisuuteen pyrolyysistä yleensä (ei vain lantojen pyrolyysistä) ja eri koemittakaavoissa sekä hankkeessa laboratoriomittakaavassa tehtyjen kokeiden tuloksiin (Sarvi ym. 2020). Laboratoriomittakaavassa tuotettu tieto ei kuitenkaan välttämättä toteudu laitosmittakaavassa. Pyrolyysin lähtöaineistoon kohdistuu siten merkittäviä epävarmuuksia, ja tuloksia voidaan pitää vain suuntaa-antavina. Teollisen mittakaavan prosessoinnissa on mahdollista optimoida yksittäisten prosessien toimintaa siten, että prosessien yhteenlaskettu kokonaistehokkuus paranee merkittävästi.

Lannan varastointiaika vaikuttaa lannasta muodostuviin metaanipäästöihin. Tehokkaat lannankäsittelyketjut mahdollistavat lyhyet varastointiajat, jolloin myös metaanipäästöjä muodostuu vähemmän. Herkkyystarkastelussa arvioitiin tilannetta, jossa lannan varastointi ennen prosessointia on huomattavasti pidempi (n. 6 kk).

Laskennallisia epävarmuuksia kohdistuu myös lopputuotteiden, kuten mädätteen kuivajakeen, pyrolysoidun lannan hiilijakeen ja kompostin vaikutuksista maaperän hiileen sekä muihin maan kasvukuntoon vaikuttaviin ominaisuuksiin. Laskennassa arvioitiin käytettävien humustumiskertoimien vaikutuksia pysyvän hiilen osuuteen.

Herkkyystarkasteluun valittiin myös fosforipitoisen lopputuotteen kuljetusetäisyyden vaikutusten tarkastelu. Perustilanteessa kuljetusetäisyydeksi asetettiin 100 km (yhdensuuntainen matka), ja herkkyystarkastelussa arvioitiin vaikutuksia, jos kuljetusetäisyys on 30 – 400 km yhdensuuntaista matkaa.

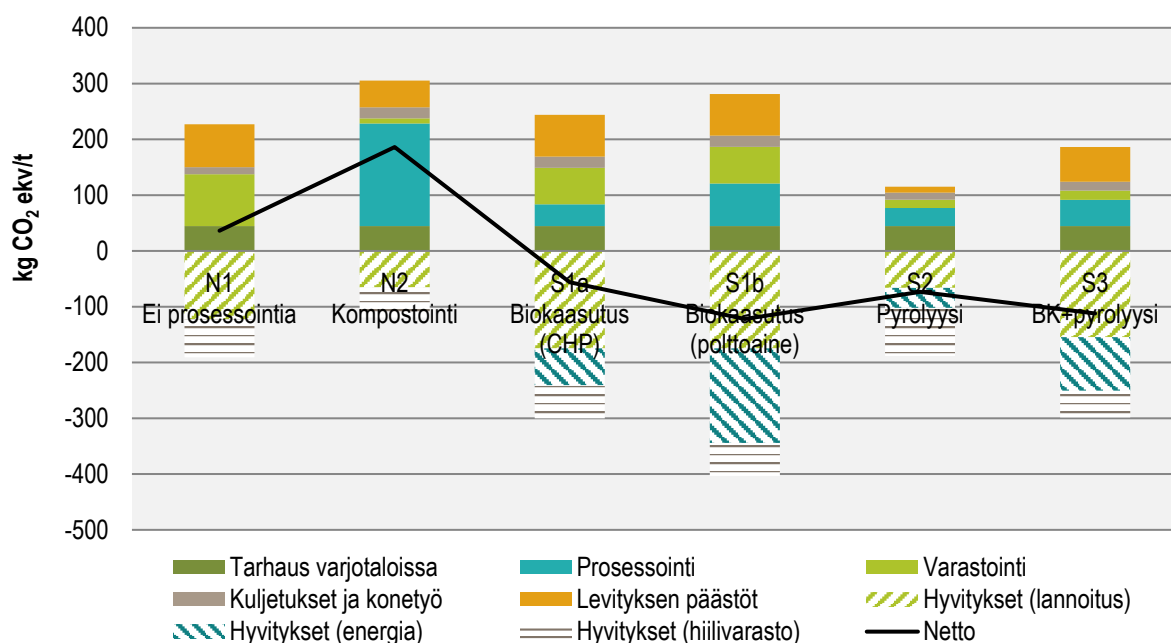
Tuotetun energian tehokas hyödyntäminen on keskeistä ympäristöhyötyjen muodostumiselle. Lannan prosessoinneissa muodostuu lämpöä yli omien tarpeiden. Herkkyystarkastelussa arvioitiin vaikutuksia, mikäli muodostuvaa lämpöä ei hyödynnetä alueella täysimääräisesti, vaan lämpöä vapautuu hukkalämpönä.

5 Tulokset ja tulosten tarkastelu

Turkiseläinten lannan hyödyntämistä voidaan kehittää nykyistä toimintatapaa kestävämmäksi. Lannan energiasisällön hyödyntäminen ja ravinteiden kierrättämistä tehostavat toimet voivat oikein toteutettuna merkittävästi vähentää lannasta aiheutuvia ilmasto-, happamoitumis- ja rehevöitymisvaikutusta. Lannan biokaasutus ja mädätteen jatkojalostus, pyrolyysi tai näiden yhdistelmä voi mahdollistaa lannan fosforin kuljettamisen voimakkaan ylijäämän alueelta fosforia tarvitseville alueille, tehostaa typen hyödyntämistä, korvata mineraalilannoitteita ja tuottaa uusiutuvaa energiaa.

5.1 Ilmastomuutos

Turkiseläinten lannan nykyisistä käsittelymenetelmistä kompostoinnissa menetetään merkittävä osa lannan typestä ja muodostuu kasvihuonekaasuja, minkä vuoksi sen ilmastovaikutus nousee varastointia ja suoraa peltokäyttöä merkittävämmäksi (Kuva 12). Vaihtoehtoisilla menetelmillä nettopäästö voi energiantuotannon sekä ravinteiden ja hiilen kierron tuomien hyvitysten myötä painua negatiiviseksi. Tällöin päästöjä laskennallisesti vältetään enemmän kuin niitä muodostuu. Kaikissa vaihtoehdoissa turkistilan toimintojen ja siten myös päästöjen oletettiin säilyvän muuttumattomana.



Kuva 12. Turkiseläinten lannan käsittelyvaihtoehtojen ilmastovaikutus (kg CO₂ ekv/t lantaa). Tasaväriset palkit (positiiviset luvut) kuvaavat muodostuvia päästöjä ja raidalliset palkit (negatiiviset luvut) hyvityksiä vältetyistä päästöistä. Nettopäästö (musta viiva) kuvaa näiden erotusta.

Nykytilaa kuvaavissa vaihtoehdoissa suurimmat päästöt aiheutuvat lannan varastoinnista tilan lantavarastoissa tai väliaikaisissa peltoaumoissa (N1) tai kompostointiprosessista (N2) johtuen niiden aikana muodostuvista ilmastoa voimakkaasti lämmittävistä metaani- ja dityppioksidipäästöistä. Pääosa lannan sisältämästä typestä haihtuu varjotalojen alla sekä varastoinnin ja kompostoinnin aikana, mutta myös lannan levityksestä aiheutuu verrattain suuret päästöt. Etenkin kompostituotteen typpipitoisuus on

alhainen, jolloin laskennalliset päästöhyvitykset mineraalityypilannoitteen käytön vähentämisestä jäävät pieniksi.

Vaihtoehtoisissa skenaarioissa nettopäästöt ovat alhaisimmat lannan biokaasutuksessa (S1b), jossa kaikki tuotettu biokaasu ohjataan liikennepolttoainekäyttöön ja tuotettu biokaasu korvaa fossiilisia polttoaineita. Laitoksen oma lämmöntarve tuotetaan tällöin hakkeella (99 %) ja polttoöljyllä (1 %), mikä vastaa tarkastelualueen keskimääräistä lämmöntuotantoa.

Lähes yhtä alhaiset ilmastovaikutukset ovat yhdistetyssä biokaasu- ja pyrolyysikäsitelyssä (S3), jossa mädätteestä separoitava kuivajae ohjataan pyrolyysiin ja biokaasusta tuotetaan sähköä ja lämpöä prosessien tarpeisiin. Lämpöä muodostuu yli oman tarpeen ja se voidaan hyödyntää lähialueella.

Syntyvät päästöt ovat selkeästi alhaisimmat pyrolyysivaihtoehdossa (S2), mutta myös laskennalliset päästöhyvitykset jäävät pienemmiksi muihin vaihtoehtoskenaarioihin verrattuna. Prosessin tuottama ylijäämälämpö on vähäinen ja kun merkittävä osuus lannan tyypestä menetetään, ovat mineraalityypilannoitteen käytön vähentämisestä saavutettavat päästöhyvitykset pienemmät. Vain pieni osa tyypestä saadaan talteen massan esikäsitelyssä, kuivauksen yhteydessä. Biokaasutuksen ja pyrolyysin yhdistelmässä (S3) päästöhyvitykset ovatkin suuremmat, sillä tyyden talteenotto on biokaasuprosessin yhteydessä merkittävä ja pyrolyysiin ohjautuu vain fosforipitoinen kuivajae.

Biokaasutuksessa (S1a ja S1b) suurimmat päästöt muodostuvat lannan ja mädätteestä jalostettavien lannoitevalmisteiden varastoinnista ja levityksestä. Mikäli syntyvä biokaasu hyödynnetään liikennepolttoaineena (S1b), myös itse biokaasuprosessin osuus päästöistä kasvaa, koska biokaasutuksen energiaomavaraisuus pienenee. Yhdistetyssä biokaasu- ja pyrolyysikäsitelyssä (S3) suurimmat päästöt muodostuvat lannoitevalmisteiden levityksestä, lannan esivarastoinnista ja itse prosessoinnista.

Levityksen aiheuttamat kasvihuonekaasupäästöt ovat melko suuria kaikissa tarkastelluissa vaihtoehtoisissa pyrolyysiä lukuun ottamatta lannan ja siitä jalostettujen lannoitevalmisteiden tyypisissä vuosissa. Pyrolyysissä (S2) suurin osa lannan tyypestä päättyy kaasujakeeseen, jolloin levitettävässä hiilijakeessa ei ole liukoista tyyppiä. Esikuivauksessa talteenotettavan tyyden määrä on vähäinen, joten myös hyvitykset sen lannoitekäytöstä mineraalityypin korvaajana jäävät alhaisemmiksi kuin muissa vaihtoehtoisissa käsittelyissä. Alhainen tyytipitoisuus lannoitevalmisteissa johtaakin mineraalilannoitteiden käytön lisäämiseen, jotta kasvin tyydentarve saadaan tyydytettyä.

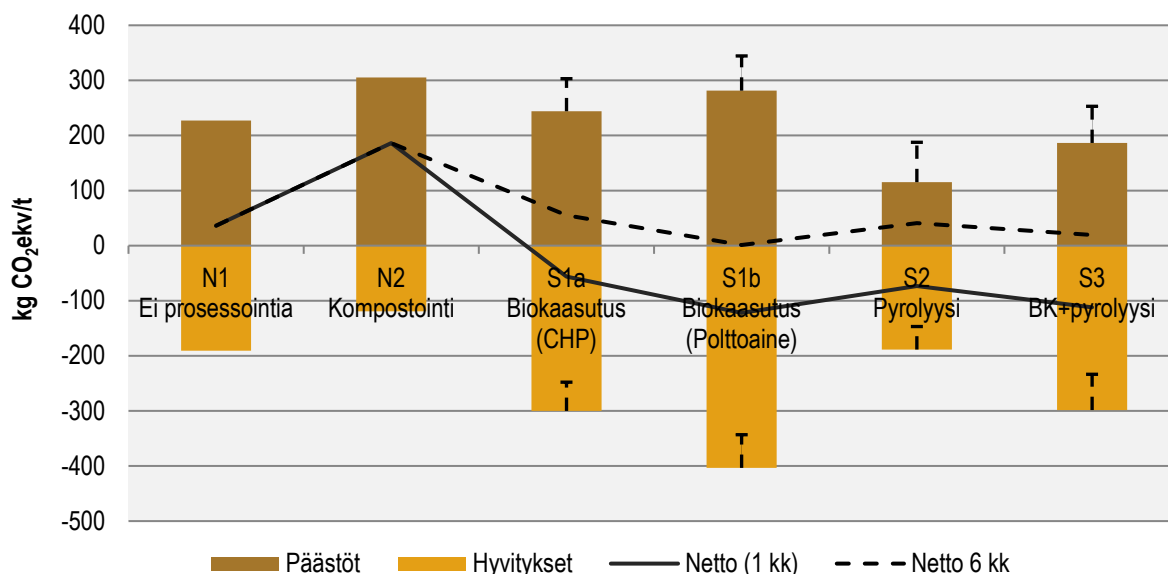
Biokaasuprosessissa osa lannan orgaanisesta tyypestä hajoaa liukoiseen muotoon ja päättyy jalostettaessa kalvosuodatuksen ravinnekonsentraattiin, joten laskennallinen päästöhyvitys on biokaasutuksen skenaarioissa mineraalityypin tarpeen laskiessa merkittävästi suurempi kuin lannan suorassa peltolevityksessä (N1), kompostoinnissa (N2) ja suorassa pyrolyysissä (S2).

Riippumatta prosessivalinnasta varastoinnin ja levityksen aikana tapahtuvat tyydenäviket ilmaan on minimoitava. Esimerkiksi kalvosuodatuksessa muodostunut ravinnekonsentraatti tulee varastoida suljetussa säiliössä ja levittää sijoituslevittämällä peltoon haihdunnan minimoimiseksi. Kompostointiprosessissa suurin osa tyydestä haihtuu ilmaan, joten mineraalilannoitteiden korvaavuus muodostuu pääosin kompostituotteen sisältämästä fosforista. Fosforin käyttökelpoisuus kasveille on tarkastelussa oletettu samaksi niin raakalannalle kuin kaikille prosessoiduille lannoitevalmisteille. Erityisesti pyrolysoituneen lannan sisältämän fosforin käyttökelpoisuus kasveille vaatii kuitenkin vielä lisätutkimuksia (Sarvi ym. 2020).

5.1.1 Varastointiajan vaikutus

Lannan varastoinnin aikana muodostuu metaania ja osa liukoisesta tyydestä karkaa ammoniakkinä. Lyhyen varastoinnin aikana päästöjä muodostuu vähemmän. Herkkyystarkastelussa arvioitiin tilannetta, jossa ennen prosessointia tapahtuva lannan varastointi on huomattavasti pidempi eli vastaava kuin nykytilassa (6 kk). Varastointiajan kasvattaminen kuukaudesta kuuteen kuukauteen nostaa kasvihuonekaasupäästöjä merkittävästi kaikissa vaihtoehtoskenaarioissa (Kuva 13). Nettopäästöt asettautuvat nykytilan tasolle biokaasu- (S1a) ja pyrolyysiskenaarioissa (S2). Biokaasukäsittelyn

liikennepolttoaineskenaariossa (S1b) ja yhdistetyssä biokaasu- ja pyrolyysikäsittelyssä kokonaisvaikutukset jäävät hieman pienemmiksi.

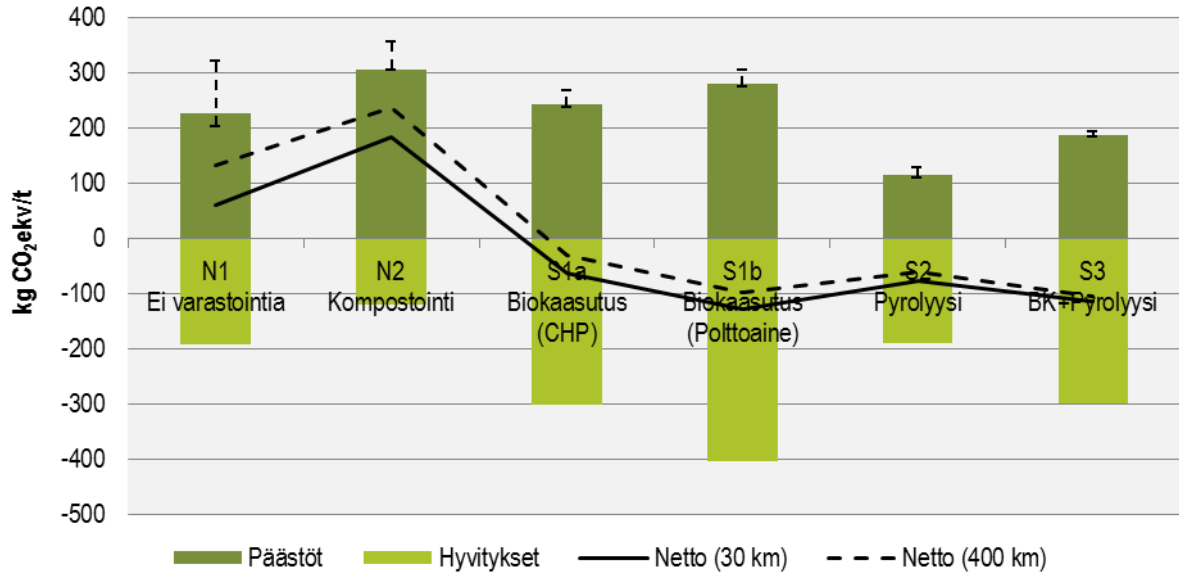


Kuva 13. Varastointiajan vaikutus turkiseläinten lannan käsittelyn ilmastovaikutukseen.: Lannan varastoinnin kesto ennen prosessointia 1 kk (musta viiva) tai 6 kk (katkoviiva). Mitä pitempi varastointiaika, sitä enemmän päästöjä ja vähemmän hyvityksiä. Virhemarginaalilla on esitetty muutokset verrattuna 1 kk:n varastointiin ja nettokäyrät kuvaavat kokonaisympäristövaikutukset eri varastointiajoilla.

5.1.2 Kuljetusmatkan vaikutus

Herkkyystarkastelussa arvioitiin myös fosforipitoisten lannoitevalmisteiden kuljetusetäisyyden vaikutusta ilmastovaikutukseen huomioiden turkistuotannon sijainti voimakkaan lantafosforin ylijäämän alueella. Perustilanteessa kuljetusetäisyydeksi asetettiin 100 km (yhdensuuntainen matka) ja herkkyystarkastelussa arvioitiin vaikutuksia, jos kuljetusetäisyys on 30 – 400 km yhdensuuntaista matkaa.

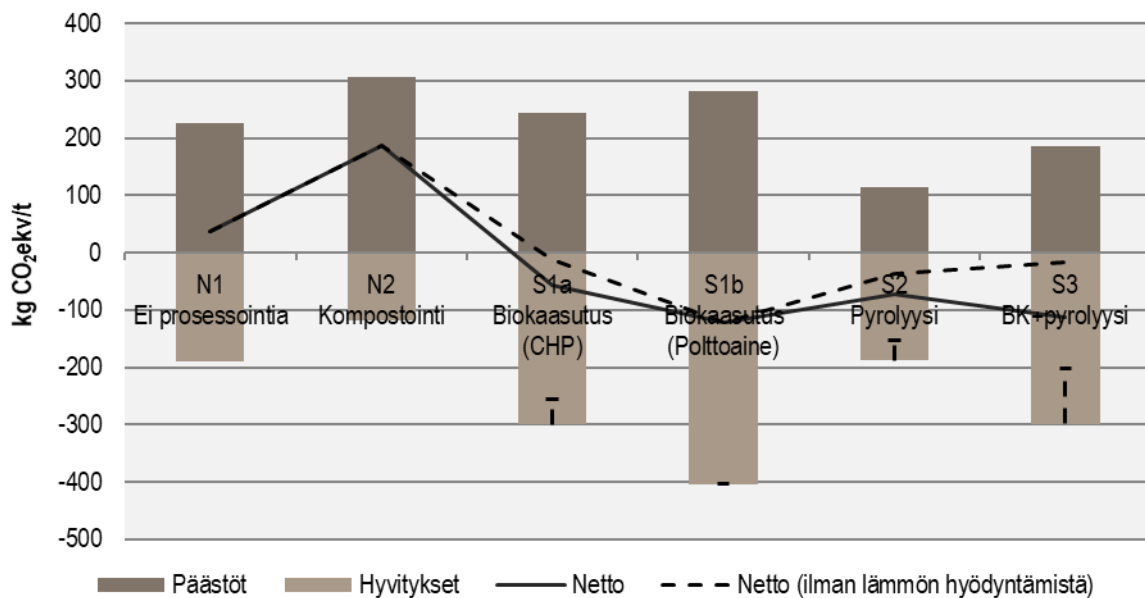
Fosforipitoisimpien lannoitevalmisteiden (pyrolysoitu lannan hiilijae ja mädätteestä separoitu kiviaineksesta) kuljetusmatkan pituudella ei havaittu olevan merkittävää vaikutusta kokonaispäästöihin, vaikka niitä kuljetettaisiin pitkiäkin matkoja (yhdensuuntainen matka 400 km; Kuva 14). Prosessoimattoman lannan kuljettaminen ei kuitenkaan ympäristömielessä ole kannattavaa, sillä kuljetettava määrä on huomattavasti suurempi kuin prosessoitujen fosforipitoisten jakeiden.



Kuva 14. Turkiseläinten lannan tai siitä jalostettujen lannoitevalmisteiden kuljetusmatkan vaikutus ilmastovaikutukseen: Mädätteestä separoidun kuivajakeen ja/tai pyrolysoidun lannan hiilijakeen kuljetusetäisyyksien vaihteluväli 30 - 400 km (yksisuuntainen matka). Virhemarginaalilla on esitetty vaihteluväli eri kuljetusmatkoilla. Nettokäyrät kuvaavat kokonaisympäristövaikutukset eri etäisyyksillä.

5.1.3 Ylijäämälämmön hyödyntäminen

Kaikelle tuotetulle energialle tulee olla hyödyntäjä, jotta ympäristöhyödyt toteutuvat. Jos tarkastelluissa biokaasutuksen ja pyrolyysin vaihtoehtoissa tuotettua ylijäämälämpöä ei voida hyödyntää, nettopäästöt kasvavat (Kuva 15).



Kuva 15. Tuotetun lämmön hyödyntämisen vaikutus turkiseläinten lannan hyödyntämisen ilmastovaikutukseen: Energiahyötys on pienempi, jos kaikkea tuotettua lämpöä ei voida hyödyntää. Samalla nettovaikutus kasvaa.

Biokaasutusskenaariossa, jossa biokaasusta tuotetaan sähköä ja lämpöä (S1a), jää muualla käytettäväksi noin 65 % tuotetusta lämmöstä. Suunnilleen sama määrä hukkalämpöä muodostuu pyrolyysissä

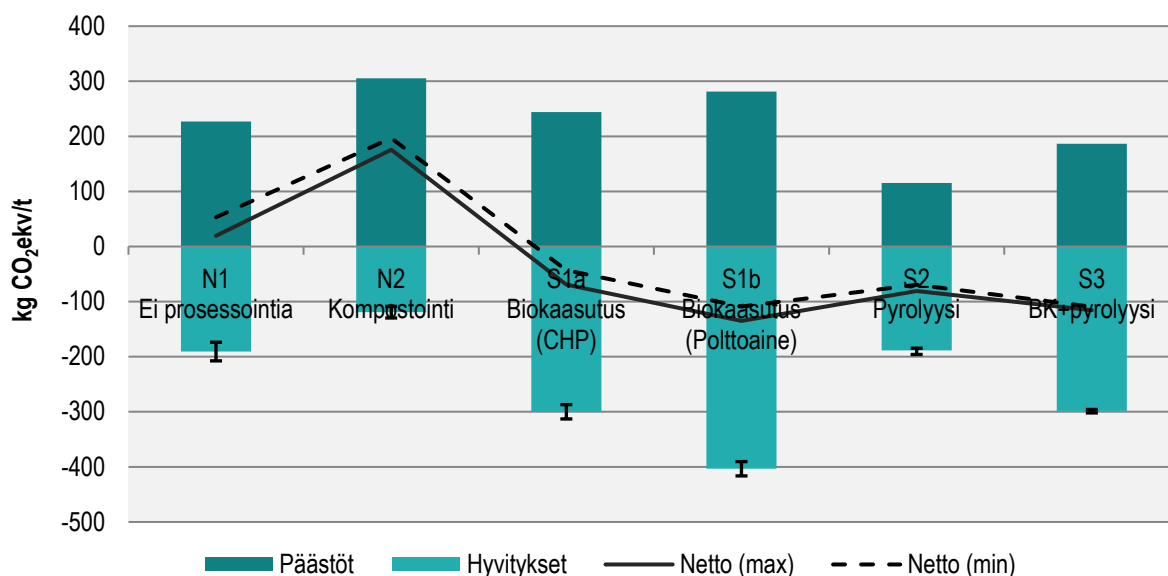
(S2). Ylijäämälämmön hyödyntämättä jättämisen vaikutus on merkittävin yhdistetyssä biokaasu- ja pyrolyysikäsitellyssä, koska lämpöä muodostuu molemmissa prosesseissa. Hyödynnettävä lämpöenergia on 2,5-kertainen muihin skenaarioihin verrattuna.

5.1.4 Hiilen hajoamisnopeuden vaikutus

Lannasta jalostettujen lannoitevalmisteiden, kuten mädätteestä separoidun kuivajakeen, pyrolysoidun lannan hiilijakeen ja kompostin vaikutuksista maaperän hiilivarastoon liittyy epävarmuuksia. Herkkyystarkastelussa arvioitiin lantaperäisen hiilen hajoamisnopeuden vaikutusta päästöihin muuttamalla pysyvän hiilen osuutta kuvaavaa humustumiskerrointa eri käsittelyissä sekä pyrolysoidun lannan hajoamisnopeutta (Taulukko 19). Lanta sekä siitä prosessoidut lannoitevalmisteet sisältävät sekä nopeasti että hitaasti hajoavaa hiiltä. Nopeasti hajoava hiili hajoaa maassa noin 5 vuoden kuluessa ja hitaasti hajoava osuus noin 1 % vuosivauhtia (Heinonsalo 2020)). Kuvassa 16 on esitetty hiilen hajoamisnopeuden vaikutus ilmastomuutokseen eri vaihtoehtoisissa.

Taulukko 19. Hiilen hajoaminen eri vaihtoehtoisissa.

Vaihtoehto	Lannoitevalmiste	Hiilen hajoaminen	Vaihteluväli	Selite
N1 Ei prosessointia	Lanta	35 %	25 – 35 %	5 vuoden kuluttua hiilestä jäljellä oleva määrä (%), jonka jälkeen jäljellä olevasta hiilestä hajoaa 1 % vuodessa (humustumiskerroin)
N2 Kompostointi	Komposti	40 %	30 – 50 %	
S1a Biokaasutus (CHP)	Kuivajae	40 %	30 – 50 %	
S1b Biokaasutus (Polttoaine)	Kuivajae	40 %	30 – 50 %	
S2 Pyrolyysi	Hiilijae	80 %	60 – 100 %	100 vuoden kuluttua hiilestä jäljellä oleva määrä (%)
S3 Biokaasutus + pyrolyysi	Kuivajakeesta pyrolysoitu hiilijae	80 %	60 – 100 %	



Kuva 16. Turbiseläinten lannan tai siitä jalostettujen hiilipitoisten lannoitevalmisteiden hiilen hajoamisnopeuden vaikutus ilmastovaikutukseen lantatonnia kohti: Hiilivaraston hyvitys pienenee, jos lannoitevalmisteen hiili hajoaa nopeammin. Virhemarginaali esittää vaihteluvälin eri hajoamisnopeuksilla, jotka on esitetty taulukossa 17. Nettokäyrät kuvaavat kokonaisilmastovaikutukset eri kertoimilla.

Hitaasti hajoavan eli humustuvan hiilen osuudella ei havaittu olevan merkittävää vaikutusta kokonaispäästöihin. Lannan prosessointi muuttaa nopeasti ja hitaasti hajoavan hiilen suhteita lannoitevalmis-

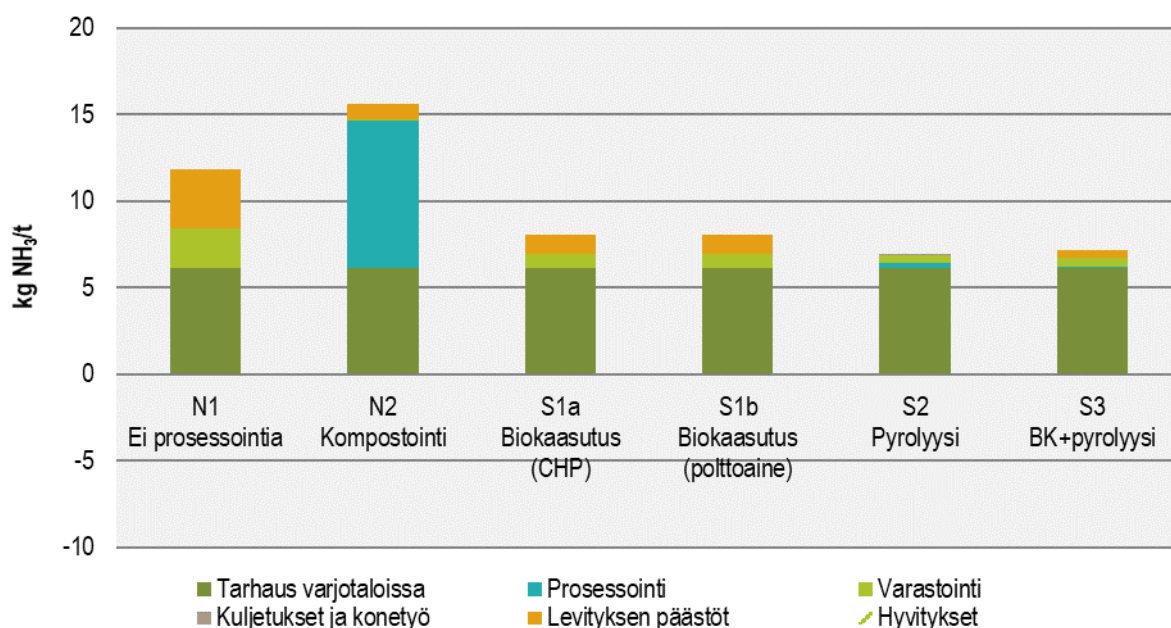
teissa verrattuna prosessoimattomaan lantaan, jossa on kaikki hiili vielä tallella. Nopeasti hajoavan hiilen huomioonottavia menetelmiä ei tässä tutkimuksessa arvioitu, koska niille soveltuvaa menetelmää ei ole vielä käytössä (Celestina ym. 2019). Myös hitaasti hajoavien hiiliyhdisteiden hajoamisen arviointi on epävarmaa, koska vallitsevaa menetelmää ei toistaiseksi ole olemassa (Arzoumanidis ym. 2014, Brandao ym. 2011, Petersen ym. 2013).

Lannan tai siitä jalostettujen lannoitevalmisteiden hiili vaikuttaa myös maan kasvukuntoon lisäämällä maan murukestävyyttä, maan rakenteen paranemista ja mikrobien määrää sekä siten myös parantaa maan multavuutta (Ravander ym. 2019). Mikrobit hajottavat hiiltä pysyvämpään muotoon ja näin kasvattavat pysyvän hiilivaraston kokoa (Wiesmeier 2019, Liang ym. 2017). Vaikka maaperän hiilivaraston muutoksiin ja muutosnopeuteen vaikuttavista toimista tarvitaankin vielä lisää tietoa, voidaan todeta, että orgaanisella lannoitevalmisteella voidaan lisätä peltomaan hiilen määrää, jos kyseessä on pitkään mineraalilannoituksella viljelty pelto (Paavola ym. 2019).

5.2 Ammoniakkipäästöt ja typen hyödyntäminen

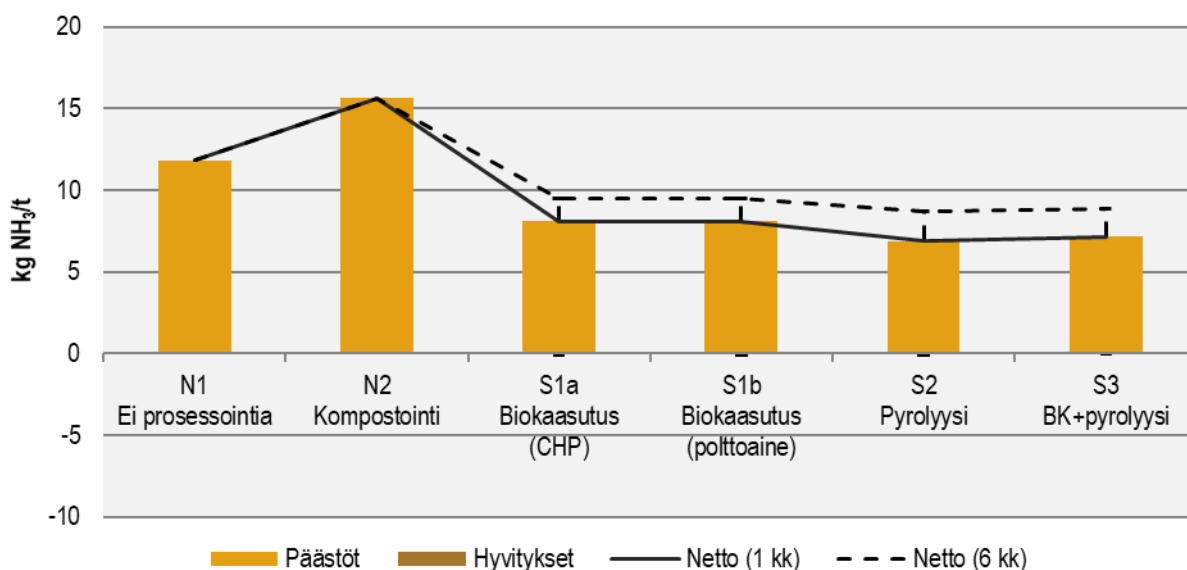
Suurin osa lannasta haihtuvista typpiyhdisteistä on ammoniakkia, joka vaikuttaa happamoitumiseen, rehevöitymiseen, ihmisten ja tuotantoeläinten terveyteen sekä epäsuorasti myös ilmastonmuutokseen. Lannan prosessointi biokaasulaitoksessa tai pyrolyysilaitoksessa vähentää ammoniakkipäästöjä nykytilaan verrattuna (kuva 16). Päästöjen väheneminen biokaasutuksessa johtuu varastointi- ja levityskäytännöjen muutoksesta mädätteen separoinnin myötä. Typpipitoinen mädätteen nestejäte tai siitä jalostettu ravinnekoncentraatti voidaan sijoituslevittää, jolloin ammoniakkipäästö on huomattavasti vähäisempi verrattuna kuivalannan tai kompostin hajalevitykseen. Pyrolysoidun lannan hiilijakeessa ei ole enää liukoista typpeä, joten sen varastoinnista ja levityksestä ei muodostu ammoniakkipäästöjä. Pyrolyysin kuivauskaasuista talteen otetun typen määrä on niin vähäinen, ettei sen käytöstä aiheutuva ammoniakkipäästö näy kuvassa 17.

Kompostoinnissa menetetään merkittävä määrä liukoista typpeä ammoniakkina ilmaan. Pieni määrä ammoniakkia muodostuu myös pyrolyysissa lannan kuivauksen yhteydessä. Turkistilalla tapahtuvien typen hävikkien osuus on kuitenkin merkittävä (ks. kpl 3).



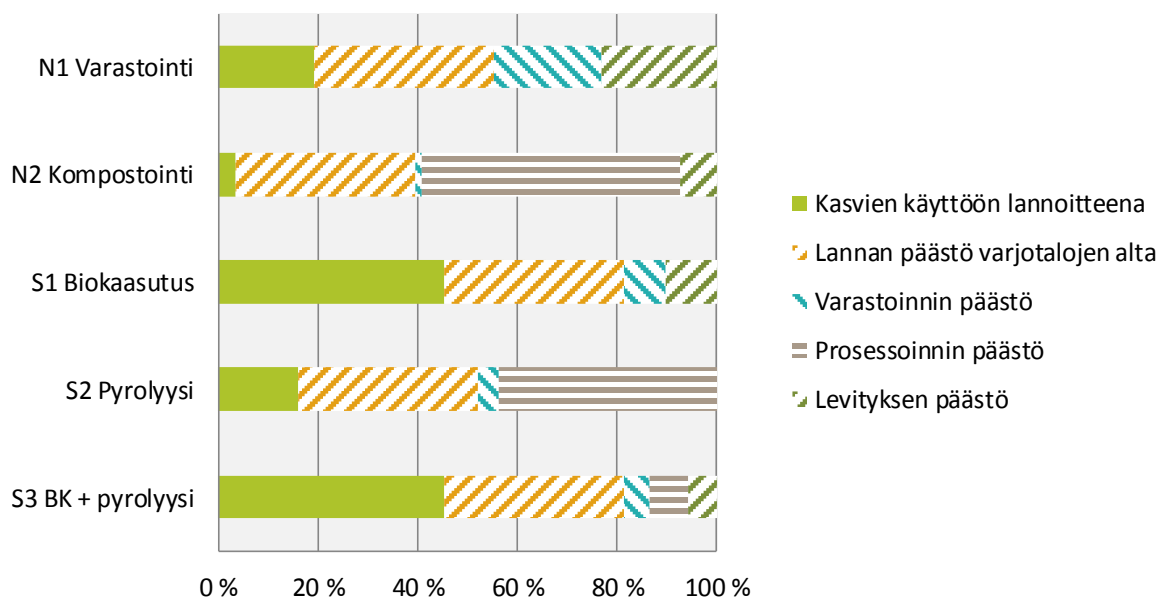
Kuva 17. Turkiseläinten lannan ammoniakkipäästöt tarkastelluissa käsittelyvaihtoehtoissa (kg NH₃/t lantaa).

Jos lantaa varastoidaan kauan ennen prosessointiin ohjaamista, ammoniakkipäästöt kasvavat ja samanaikaisesti kasvien käyttöön päätyvän liukoisen typen määrä vähenee (kuva 18).



Kuva 18. Turkiseläinten lannan ja/tai siitä jalostettujen lannoitevalmisteiden varastointiajan vaikutus ammoniakkipäästöihin: Lannan varastoinnin kesto ennen biokaasutusta tai pyrolyysiä 1 - 6 kk. Pidemmällä varastointiajalla päästöt kasvavat ja hyvitykset pienenevät. Virhemarginaalilla on esitetty muutokset verrattuna 1 kk:n varastointiin ja nettokäyrät kuvaavat kokonaisympäristövaikutukset eri varastointiajoilla.

Nykytilassa eläinten lantaan erittämästä liukoisesta tyypestä päätyy kasvien käytettäväksi vain 4 – 20 %. Eniten (45 %) eritetystä liukoisesta tyypestä päätyy kasvien käyttöön biokaasutusvaihtoehdoissa (kuva 19).

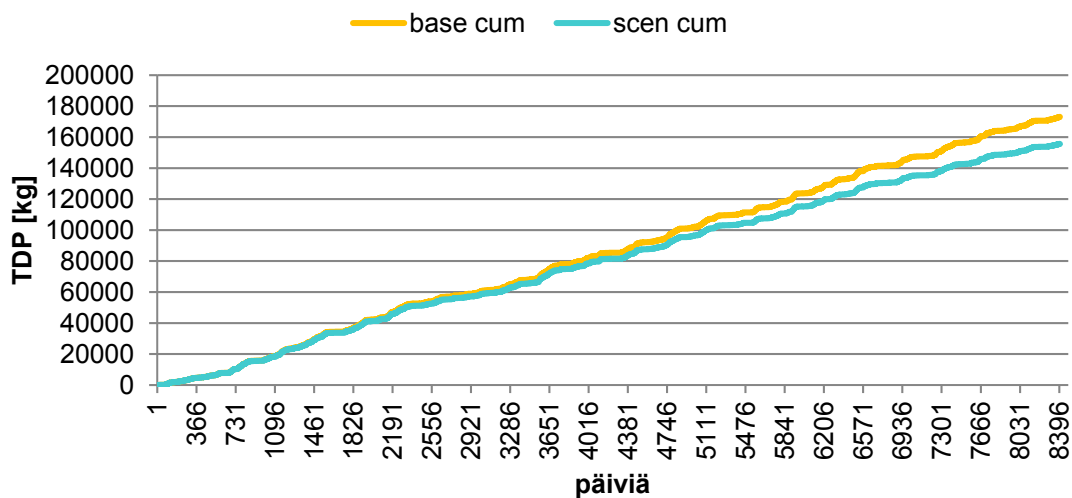


Kuva 19. Liukoisen typen haihtuminen turkiseläinten lannan vaihtoehtoisten käsittelyjen elinkaaren eri vaiheissa ja kasvien käyttöön päätyvän typen osuus eri vaihtoehdoissa.

Prosessoitujen lantojen ammoniakkipäästöjen arviointiin ei ole toistaiseksi olemassa kansainvälistä päästöjen arviointimenetelmää, minkä vuoksi tässä tutkimuksessa tehdyt arviot perustuvat vastaaviin päästökertoimiin kuin lannalla (EMEP/EEA 2016, Grönroos ym. 2017). Separoimattomasta mädätteestä ammoniakkipäästö voi olla suurempi kuin lannasta, koska mädätteen liukoisen typen osuus on lantaa suurempi. Toisaalta mädätteen separoinnissa liukoisesta tyydestä suurin osa päättyy nestejakeeseen, jolloin nestejakeen ammoniakkipäästöjen voi olettaa olevan samalla tasolla kuin esimerkiksi virtsasta. Kuivajakeeseen päättyy vähemmän liukoista tyyppiä. Kuivajakeen levitystapa on vastaava kuin kuivalannalla, mutta sen liukoisen typen pitoisuus ja siten haihtumisriski ovat separoinnin vuoksi alhaisempia kuin nykytilassa prosessoimattomalla lannalla.

5.3 Vesistöjen rehevöityminen

Lantaperäisen fosforin siirtäminen pois tarkastelualueelta vähentää tarkastelun mukaan leville suoraan käyttökelpoisen liukoisen fosforin kuormitusta selvästi (Kuva 20). Leville suoraan käyttökelpoisen liukoisen fosforin kuormitus vähenisi lantafosforin prosessoinnin ja kuljettamisen sekä siten alueellisen vähäisemmän käytön myötä 20 vuoden tarkastelujakson aikana 21,5 %, mikä vaikuttaa positiivisesti vesien tilaan. Muutos näkyisi hitaasti luonnon omien puskuriprosessien takia. Yksi näistä puskuriprosesseista johtuu fosforin kiinnittymisestä lujasti maahiukkasiin, minkä vuoksi peltomaan fosforivaraston on ensin laskettava ennen kuin pelloilta lähtevä huuhtouma vähenee. Lannan prosessointi lantafosforin keskittymissä kuljetettavampaan muotoon ja lantafosforin käyttö fosforilannoituksesta hyötyvillä alueilla kuitenkin selvästi vähentää pitkällä aikavälillä maataloudesta aiheutuvan fosforihuuhtouman vähene- mistä.



Kuva 20. Liukoisen fosforin (TDP) huuhtoutuminen tarkastelualueella (Lapuanjoen vesistöalue) nykytilassa (base cum) ja alueellisen biokaasulaitoksen yhteydessä (scen cum).

6 Yhteenveto ja johtopäätökset

Turkiseläinten lanta sisältää runsaasti fosforia, ja se sisältää paljon myös typpeä. Koska turkistuinto ei hyödynnä itse lantaa tuotantoketjussaan, lanta luovutetaan tai myydään nykyisin lähialueiden viljelijöille sellaisenaan tai kompostoituna. Suomen turkistuinto on kuitenkin keskittynyt alueelle, jolla on runsaasti muutakin kotieläintuotantoa, korkeat peltomaan fosforivarastot ja siksi ylitarjontaa lantafosforista. Arvokkaan fosforin tehokkaammaksi kierrättämiseksi ja vesistövaikutusten vähentämiseksi turkiseläinten lanta tulisi voida hyödyntää alueilla, missä fosforille on tarvetta.

Turkiseläinten lannan nykyiset käsittelytoimet ovat lannan ravinteiden hyötykäytön kannalta tehotomia ja kuormittavat ympäristöä. Tihennetty lannan poisto sekä lannan varastointi katettuna tai peitettynä voivat vähentää typpihävikkejä, jolloin myös lannan lannoitearvo säilyy parempana. Paremmat tilatoimet vaatisivat kuitenkin myös uudenlaisen tekniikan kehittämistä ja käyttöönottoa. Lannan kompostoinnin päästöjä voitaisiin vähentää lisäämällä laitoskompostoinnin osuutta aumakompostoinnin sijaan ja talteenottamalla laitoskompostoinnin yhteydessä haihtuva typpi. Tehostetulla kompostoinnilla typpeä jäisi kierrätettäväksi kasvien käyttöön enemmän. Samalla kompostoinnin aiheuttamat ravinnehuuhtoumat olisivat paremmin hallittavissa.

Alueellisen lantafosforin ylijäämän purkamiseen tarvitaan kuitenkin kokonaan uudenlaisia toimenpiteitä. Lantaa tulisi prosessoida siten, että typpi ja fosfori saadaan erilleen ja käyttöön siellä, missä niitä tarvitaan. Erityisesti fosforin väkevöinti helposti kuljetettavaan muotoon on tarpeen. Mitä paremmin typpi saadaan erotettua fosforista ja otettua talteen, sitä tehokkaammin se voidaan hyödyntää lähialueen kasvintuotannossa.

Tässä tutkimuksessa arvioitiin turkiseläinten lannan nykyisten käsittelymenetelmien (varastointi ja suora peltolevitys tai kompostointi) sekä vaihtoehtoisten käsittelyketjujen (biokaasutus ja mädätteen jatkojalostus, pyrolyysi) elinkaarisia ympäristövaikutuksia. Tulosten perusteella sekä lannan biokaasutuksella että mädätteen jatkojalostuksella (tehokas separointi, nestejakeen kalvosuodatus ja kuivajakeen suora peltolevitys tai pyrolyysi) tai suoralla pyrolyysillä voidaan vähentää lannan elinkaarisia ilmasto- ja rehevöitymisvaikutuksia sekä vähentää ammoniakkipäästöjä. Päästövähennysten edellytyksenä kuitenkin on, että koko toimintaketju hallitaan hyvin kaikissa elinkaaren vaiheissa, että fosforin käytön ratkaisut purkavat alueellista fosforiylijäämää, ja että laskennalliset päästöhyvitykset energian, lannoitteiden sekä hiilivaraston osalta toteutuvat.

Merkittävä osa kasvihuonekaasupäästöistä muodostuu lannan varastoinnin aikana. Toimintaketjut ja prosessit tulisi suunnitella niin, että lannan pitkältä varastointiajalta vältetään. Ilmastohyötyjen toteutuminen edellyttää lyhyttä lannan varastointia ennen prosessointia sekä kaiken tuotetun energian hyödyntämistä. Biokaasutuksella ja pyrolyysillä on saavutettavissa korkeammat lannoitehyvitykset kuin nykyisissä toimintatavoissa, koska muodostuvien lannoitevalmisteiden lannoitteilla voidaan korvata suurempi osuus mineraalifosforin tarpeesta sitä tarvitsevilla alueilla ja biokaasutuksessa myös liukoisen typen hyödyntäminen tehostuu. Peltomaan hiilivaraston kasvu on suurinta lannan pyrolyysissa hiilijakeen hiilen hitaan hajoamisen vuoksi, mutta erot tarkasteltujen vaihtoehtojen välillä eivät ole suuria. Mikäli laskennalliset päästöhyvitykset eivät toteudu tai lantaa välivarastoidaan kauan ennen prosessointiin ohjaamista, kokonaispäästöt pysyvät nykytilan tasolla.

Lannan prosessointi biokaasu- ja/tai pyrolyysilaitoksessa vähentää ammoniakkipäästöjä nykytilaan verrattuna. Päästöjen väheneminen biokaasutuksessa johtuu levitys- ja varastointikäytäntöjen muutoksesta, kun lanta on mädätteenä separoitavissa neste- ja kuivajakeeseen. Biokaasutus mahdollistaa myös lannan liukoisen typen tehokkaamman hyödyntämisen, sillä liukoista typpeä päätyy biokaasuvaihtoehtoissa kasvien käyttöön 45 % alkuperäisestä liukoisesta tyydestä verrattuna nykytilan 4-10 %:iin.

Fosforiylilijämaisien alueen fosforilannoituksen vähentäminen lannan prosessoinnin ja pois kuljetamisen avulla vähentää pitkällä aikavälillä leville suoraan käyttökelpoisen liukoisen fosforin kuormitusta selvästi, mikä vaikuttaa myönteisesti vesien tilaan. Muutos näkyy hitaasti luonnon omien puskuri-prosessien takia. Muutos edellyttää, ettei lantafosforia korvata alueella mineraalifosforin käytöllä.

Suurin päästöhyvyitys saavutetaan, jos lannasta tuotettu energia korvaa fossiilisten polttoaineiden käyttöä. Tuloksissa esitetyt korvaushyödyt on laskettu täysimääräisinä, vaikkei tämä käytännössä välttämättä toteudu. Todelliseen korvaushyötyyn vaikuttaa, miten kulutusta ja päästöjä yhteiskunnassa säännellään. Mikäli todellinen korvaushyöty on alhaisempi kuin nyt laskettu, on laskennallinen päästösäästö vähäisempi. Vastaavasti mineraalilannoitteiden korvaavuushyöty on laskennallinen. Jos esimerkiksi lantaperäinen fosfori ei siirry alueille, missä fosforista on pulaa, ja vähennä mineraalifosforin käyttöä, päästöhyvitystä ei tällöin muodostu niin kuin nyt tuloksissa on esitetty.

Biokaasuprosessissa metaanivuotojen hallinta kaikista tuotannon eri vaiheista on keskeistä ympäristöhyötyjen toteutumisen kannalta, koska metaani on voimakas kasvihuonekaasu. Laitosrakenteiden tiiveys, poistokaasujen poltto biokaasun puhdistusprosessissa biometaaniksi sekä prosessin riittävä viipymä mädätteen hyvän laadun varmistamiseksi ovat olennaisia metaanipäästöjen minimoimiseksi. Mädätteen ja siitä separoitujen jakeiden varastoinnin ja levityksen aikaisten päästöjen arviointiin tarvitaan lisää tutkittua tietoa päästöarvioinnin täsmentämiseksi.

Lannan pyrolyysi ei ole vielä vakiintunutta tekniikkaa. Vaikka tässä tutkimuksessa lasketut tulokset vaikuttavat lupaavilta, pyrolyysin ympäristöhyödyt tulee arvioida tapauskohtaisesti. Prosessivariaatioita on useita, mikä vaikuttaa myös saatavien lopputuotteiden määrään ja koostumukseen. Laskennan lähtötietoihin liittyy lisäksi epävarmuutta ja lisää tutkimustietoa tarvitaan laskennan täsmentämiseksi. Ravinteiden kierrätyksen näkökulmasta prosessissa haihtuvan typen talteenottoa tulisi kehittää esimerkiksi strippaamalla sitä kuivauskaasuista ammoniumsulfaatiksi.

Lannan hiilivarastovaikutuksia arvioitiin tässä tutkimuksessa SYKEN asiantuntijayhteistyössä kehitetyllä menetelmällä. Menetelmä huomioi lannan hiilestä pysyvän, eli humustuvan hiilen osuuden. Nopeasti hajoavan hiilen vaikutuksia maaperässä ei vielä tunneta riittävästi, joten niiden vaikutuksia on tässä vaiheessa mahdoton arvioida. Prosessoinnin vaikutuksia lannan nopeasti ja hitaasti hajoavan hiilen suhteisiin tulee selvittää tarkemmin sekä kehittää vaikutusten arvioimiseen soveltuvia menetelmiä.

Sanasto

BOD7	Biologinen hapenkulutus
C	Hiili
CH ₄	Metaani
CO ₂	Hiilidioksidi
CO ₂ ekv	Hiilidioksidiekvivalentti, kasvihuonekaasupäästöjen yksikkö
N ₂ O	Dityppioksidi
Nsol	Liukoinen typpi
Ntot	Kokonaistyppi
pH	Happamuus
Ptot	Kokonaisfosfori
TS	Kuiva-aine
VS	Orgaaninen aines

Lähteet

- Aakkula, J., Asikainen, A., Kohl, J., Lehtonen, A., Lehtonen, H., Ollila, P., Regina, K., Salminen, O., Sievänen R. & Tuomai-
nen T. 2019. Maatalous- ja LULUCF-sektorien päästö- ja nielukehitys vuoteen 2050. Valtioneuvoston selvitys- ja tutki-
mustoiminnan julkaisusarja 20/2019. 70s. [http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161408/20-2019-
MALULU_.pdf](http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161408/20-2019-MALULU_.pdf). [Vierailtu 22.5.2020.]
- Amon, B., Kryvoruchko, V., Amon, T. & Zechmeister-Boltnstern, S. 2006. Methane, nitrous oxide and ammonia emissions
during storage and after application of dairy cattle slurry and influence of slurry treatment. *Agriculture Ecosystems &
Environment* 112: 153–162.
- Arzoumanidis, I., Fullana-i-Palmer, P., Raggi, A. & Gazulla, C. 2014. Unresolved issues in the accounting of biogenic carbon
exchanges in the wine sector. *Journal of Cleaner Production* 82: 16–22.
- Baldock, J. A. & Smernik, R. J. 2002. Chemical composition and bioavailability of thermally altered *Pinus resinosa* (Red pine)
wood. *Org. Geochem.* 33(9), 1093–1109.
- Bals, B.D. & Dale, B.E. 2012. Developing a model for assessing biomass processing technologies within a local biomass pro-
cessing depot. *Bioresource Technology* 106: 161–9.
- Basu, P. 2010. *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory*. Academic Press, USA. S. 552.
- Bergman, R. D., Gu, H., Page-Dumroese, D. S. & Anderson, N. M. 2017. Life cycle analysis of biochar. *Julk. Bruckman, V.,
Varol, E. A., Uzun, B. & Liu, J. (toim.). Biochar: A Regional Supply Chain Approach in View of Climate Change Mitiga-
tion*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. S. 46–69.
- Brandao, M., Canals, L.M. & Clift, R. 2011. Soil organic carbon changes in the cultivation of energy crops: Implications for
GHG balances and soil quality for use in LCA. *Biomass and Bioenergy* 35: 2323–2336.
- Bridgwater, T. 2007. Biomass Pyrolysis. IEA Bioenergy Task 24. [https://www.ieabioenergy.com/wp-
content/uploads/2013/10/Task-34-Booklet.pdf](https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2013/10/Task-34-Booklet.pdf). [Vierailtu 22.5.2020.]
- Cantrell, K. B., Hunt, P. G., Uchimiya, M., Novak, J. M. & Kyoung S. R. 2012. Impact of pyrolysis temperature and manure
source on physicochemical characteristics of biochar. *Bioresource Technology* 107: 419–428.
- Chan, K.Y., Van Zwieten, L., Meszaros, I., Downie, A. & Joseph, S. 2008. Using poultry litter biochars as soil amendments.
Australian Journal of Soil Research 46: 437–444.
- Cordell, D., Rosemarin, A., Schröder, J. J. & Smit, A. L. 2011. Towards global phosphorus security: A systems framework for
phosphorus recovery and reuse options. *Chemosphere* 84(6): 747–758.
- Cunningham, M., Gold, M. & Strande, L. 2016. Literature review: Slow pyrolysis of faecal sludge. EAWAG.
[https://www.dora.lib4ri.ch/eawag/islandora/object/eawag%3A14834/datastream/PDF/Cunningham-2016-
Literatur_review-%28published_version%29.pdf](https://www.dora.lib4ri.ch/eawag/islandora/object/eawag%3A14834/datastream/PDF/Cunningham-2016-Literatur_review-%28published_version%29.pdf). [Vierailtu 22.5.2020.]
- Demirbas, A. 2004. Effect of initial moisture content on the yields of oily products from pyrolysis of biomass. *Journal of Ana-
lytical and Applied Pyrolysis*. 71(2): 803–816. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165237003001773>.
[Vierailtu 22.5.2020.]
- EBC 2012. European Biochar Certificate - Guidelines for a Sustainable Production of Biochar. European Biochar Foundation
(EBC), Arbaz, Switzerland. <http://www.european-biochar.org/biochar/media/doc/ebc-guidelines.pdf>. [Vierailtu
22.5.2020.]
- Ecoinvent 2020. Ecoinvent tietokanta versio 3.5. www.ecoinvent.org [Vierailtu 7.7.2020.]
- EMEP/EEA 2016. EMEP/EEA air pollutant emission inventory Guidebook 2016. 3.B Manure management. European Envi-
ronment Agency. <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2016>. [Vierailtu 22.5.2020.]
- Ervasti, S., Winquist, E. & Rasi, S. 2018, Typen talteenotto lantaperäisestä nesteestä- Tekniikan toteutettavuus ja prosessin
kannattavuusarvio. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 4/2018.
- Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus 2019/1009/EU, annettu 5 kesäkuuta 2019, EU:n lannoitevalmisteiden asettamista
saataville markkinoilla koskevien sääntöjen vahvistamisesta ja asetusten 1069/2009/EY ja 1107/2009/EY muuttamisesta
sekä asetuksen 2003/2003/EY kumoamisesta. *Euroopan unionin virallinen lehti* (L170):1–114.
- Fassinou, W. F., Van de Steene, L., Toure, S., Volle, G. & Girard, P. 2009. Pyrolysis of *Pinus pinaster* in a two-stage gasifier:
Influence of processing parameters and thermal cracking of tar. *Fuel Processing Technology* 90: 75–90.

- FIFUR 2019. Fifur tilastot 2019. Suomen turkiseläinten kasvattajain liitto.
https://fifur.fi/sites/default/files/fifur_tilastot_2019_0.pdf. [Vierailtu 22.5.2020.]
- Ghaly, A. E. & Alhattab, M. 2013. Drying Poultry Manure for Pollution Potential Reduction and Production of Organic Fertilizer. *American Journal of Environmental Science* 9(2): 88–102.
- Grönroos, J. 2014. Maatalouden ammoniakkipäästöjen vähentämismahdollisuudet ja –kustannukset. Ympäristöministeriön raportteja 26/2014.
- Grönroos, J., Munther, J. & Luostarinen S. 2017. Calculation of atmospheric nitrogen and NMVOC emissions from Finnish agriculture. Description of the revised model. Reports of the Finnish Environment Institute, 37.
- Heinonsalo, J. (Toim.) 2020. Hiiliopas. Katsaus maaperän hiileen ja hiiliviljelyn perusteisiin. <https://carbonaction.org/wp-content/uploads/2020/01/BSAG-hiiliopas-1.-painos-2020.pdf>. [Vierailtu 22.5.2020.]
- Heikkinen, J., Ketoja, E., Seppänen, L., Luostarinen, S. & Regina, K. Chemical quality and decomposition of typical organic amendments used in agricultural soils. Julkaisematon käsikirjoitus.
- Helin, T., Salminen, H., Hynynen, J. & Soimakallio, S. 2016. Global warming potentials of stemwood used for energy and materials in Southern Finland: differentiation of impacts based on type of harvest and product lifetime. *GCB Bioenergy* 8: 334–345.
- Hennesy, J. & Eriksson, O. 2015. Energy and nutrients from horse manure: Life-cycle data inventory of horse manure management systems in Gävleborg, Sweden.
- Huygens, D., Saveyn, H. G. M, Tonini, D., Eder, P. & Delgado Sancho, L. 2019. Technical proposals for selected new fertilising materials under the Fertilising Products Regulation (Regulation (EU) 2019/1009) European Commission. <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/technical-proposals-selected-new-fertilising-materials-under-fertilising-products-regulation>. [Vierailtu 7.7.2020.]
- Iivonen, S. 2008. Ympäristöturpeet ja niiden käyttö. Helsingin yliopisto Ruralia Instituutti, Raportteja 32.
- IPCC 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T. & Tanabe K. (eds.). IGES, Japan.
- IPCC 2014. Climate Change 2014. Mitigation of Climate Change. Intergovernmental panel on climate change. WGIII. Working group III contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge university press 2014.
- ISO 14040:2006. Environmental management -- Life cycle assessment -- Principles and framework.
- Jimenez, J., Aemig, Q., Doussiet, N., Steyer, J.-P., Houot, S. & Patureau, D. 2015. A new organic matter fractionation methodology for organic wastes: Bioaccessibility and complexity characterization for treatment optimization. *Bioresource Technology* 194: 344–354.
- Karvosenoja, N. 2018. SYKE:n FRES-mallin tietokanta. <https://www.syke.fi/hankkeet/fres>
- Kauppi, I. 2018. Closing nutrient cycles of material flows from agriculture, industry and communities by combining biogas and pyrolysis processes. Gasum. Final report.
- Kapuinen, P. 1993. Naudanlihan tuotantomenetelmät ja -rakennukset II. Vakolan tutkimus- ja -koulutuskeskus. Vihti. ISSN 0782-0054.
- Kemppainen, E. 1985. Kuivikkeen vaikutus lannan arvoon. Kuivikkeiden ammoniakkin sitomiskyky. Maatalouden tutkimuskeskus. Tiedote 9/85.
- Keskinen, R., Hyväluoma, J., Sohlo, L., Help, H. & Rasa, K. 2019. Fertilizer and soil conditioner value of broiler manure biochars. *Biochar* 1: 259. <https://doi.org/10.1007/s42773-019-00020-7>
- Kujala, M. 2012. Biosampo koulutus- ja tutkimuskeskuksen hitaan pyrolyysireaktorin koeajo. Kymenlaakson ammattikorkeakoulu, Teknologiaosaamisen johtaminen. Opinnäytetyö. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/48984/Kujala%20Mia.pdf?sequence=1>. [Vierailtu 25.5.2020.]
- Kymäläinen, M. & Pakarinen, O. 2015. Biokaasuteknologia : Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen. In: Kymäläinen, M. (Ed.). HAMKin e-julkaisuja 36/2015, HAMKin julkaisuja 17/2015.
- Laitinen, A. 2015. Kolmivaiheisen pyrolyysiprosessin mallintaminen. Jyväskylän yliopisto, Kemian laitos. Pro Gradu -tutkielma. <https://jyx.jyu.fi/bitstream/handle/123456789/48787/URN:NBN:fi:jyu-201602151576.pdf?sequence=1>. [Vierailtu 25.5.2020.]
- Lehmann, J., Czimczik, C., Laird, D. & Sohi, S. 2009. Stability of biochar in soil. In: Lehmann, J. & Joseph, S. (Eds.). *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Earthscan: London. P. 183–206.

- Lehto, J., Oasmaa, A., Solantausta, Y., Kytä, M. & Chiaramonti, D. 2013. Fuel oil quality and combustion of fast pyrolysis bio-oils. VTT Technology 87. S. 79.
- Lei, O. & Zhang, R. 2013. Effects of biochars derived from different feedstocks and pyrolysis temperatures on soil physical and hydraulic properties. *J Soils Sediments* 13:1561–1572.
- Leikas, T. 2015. Biokaasun koostumus ja rikkivetypitoisuuden hallinta. Case Stormossen BR2. Vaasan ammattikorkeakoulu. Ympäristöteknologia. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/90984/Leikas_Timo.pdf?sequence=1&isAllowed=y. [Vierailtu 25.5.2020.]
- Lemola, R., Uusitalo, R., Hyväluoma, J., Sarvi, M. & Turtola, E. 2018. Suomen peltojen maalajit, multavuus ja fosforipitoisuus. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 17/2018. Helsinki.
- Liang, C., Schimel, J. P. & Jastrow, J. D. 2017. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage. *Nature microbiology*. Volume 2. Article number 17105.
- Liu, X. & Li, Z. 2014. Energy balance analysis of the cattle manure slow pyrolysis process. In: Bettendorf, T., Wendland, C. & Otterpohl, R. (Eds.). *Terra Preta Sanitation*. Deutsche Bundesstiftung Umwelt.
- Luostarinen, S., Grönroos, J., Hellstedt, M., Nousiainen, J. & Munther, J. 2017a. Finnish Normative Manure System. System documentation and first results. *Natural resources and bioeconomy studies* 48/2017.
- Luostarinen, S., Perttilä, S., Nousiainen, J., Hellstedt, M., Joki-Tokola, E., & Grönroos, J. 2017b. Turkeläinten lannan määrä ja ominaisuudet -tilaseurannan ja lantalaskennan tulokset. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 46/2017.
- Luostarinen, S., Tampio, E., Berlin, T., Grönroos, J., Kauppila, J., Koikkalainen, K., Niskanen, O., Rasa, K., Salo, T., Turtola, E., Valve, H. & Ylivainio, K. 2019a. Keinoja orgaanisten lannoitevalmisteiden käytön edistämiseen. Maa- ja metsätalousministeriön julkaisuja 2019/5.
- Luostarinen, S., Tampio, E., Niskanen, O., Koikkalainen, K., Kauppila, J., Valve, H., Salo, T. & Ylivainio, K. 2019b. Lanta-biokaasutuen toteuttamisvaihtoehdot. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 40/2019. S. 75. https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/544244/luke-luobio_40_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y. [Vierailtu 25.5.2020.]
- Luostarinen, S., Grönroos, J., Lemola, R., Lehtonen, E., Lehtoranta, S., Tampio, E., Turtola, E. & Uusitalo, R. 2019c. Ravin-nelaskuri – Alueellisen ravinnekierron suunnittelun työkalu. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus X/2019 (julkaistu osana viranomaiskäyttöön luotua Ravin-nelaskuri-työkalua). <https://www.luke.fi/projektit/ravinnelaskuri/>
- Manninen, K., Grönroos, J., Luostarinen, S. & Saastamoinen, M. 2016. Hevosenlannan energiakäytön ympäristövaikutukset. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 30/2016. Luonnonvarakeskus.
- Marttinen, S., Tampio, E., Sinkko, T., Timonen, K., Luostarinen, S., Grönroos, J. & Manninen, K. 2015. Biokaasulaitokset-syötteistä lopputuotteisiin. Energia, ravinteet ja ympäristövaikutukset. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 14/2015.
- Marttinen, S., Venelampi, O., Iho, A., Koikkalainen, K., Lehtonen, E., Luostarinen, S., Rasa, K., Sarvi, M., Tampio, E., Turto-la, E., Ylivainio, K., Grönroos, J., Kauppila, J., Koskiahho, J., Valve, H., Laine-Ylijoki, J., Lantto, R., Oasmaa, A. & Cas-tell-Rüdenhausen, M. 2017. Kohti ravinteiden kierrätyksen läpimurtoa. Nykytila ja suositukset ohjauskeinojen kehittä-miseksi Suomessa. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 45/2017.
- Mikkola, H., Puumala, M., Kallioniemi, M., Grönroos, J., Nikander, A. & Holma, M. 2002. Paras käytettävissä oleva tekniikka kotieläintaloudessa. Suomen ympäristökeskus. ISBN: 952-11-1178-X (nid.), ISBN: 952-11-1179-8 (pdf).
- Mirkouei, A., Haapala, K., Sessions, J. & Murthy, G.S. 2017. A review and future directions in techno-economic modeling and optimization of upstream forest biomass to bio-oil supply chains. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67: 15–35.
- MMM (Maa- ja metsätalousministeriö) 2018. Toimintaohjelma maatalouden ammoniakkipäästöjen vähentämiseksi Suomessa. Maa- ja metsätalousministeriön julkaisusarja 1/2018.
- Motiva 2013. Biokaasun tuotanto maatilalla. https://www.motiva.fi/files/6958/Biokaasun_tuotanto_maatilalla.pdf. [Vierailtu 25.5.2020.]
- Monlau, F., Sambusiti, C., Antoniou, N., Barakat, A. & Zabaniotou, A. 2015. A new concept for enhancing energy recovery from agricultural residues by coupling anaerobic digestion and pyrolysis process. *Applied Energy* 148: 32–38.
- Murphy, J. D. (toim.) 2017. Methane emissions from biogas plants. Methods for measurement, results and effect on greenhouse gas balance of electricity produced. IEA Bioenergy Task 37.
- Myllymaa, T., Moliis, K., Tohka, A., Rantanen, P., Ollikainen, M. & Dahlbo, H. 2008. Jätteiden kierrätyksen ja polton käsitte-lyketjujen ympäristökuormitus ja kustannukset. Inventaarioraportti. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 28/2008.

- Nitraattiasetus 1250/2014, annettu 1 huhtikuuta 2015, Valtioneuvoston asetus eräiden maa- ja puutarhataloudesta peräisin olevien päästöjen rajoittamisesta. <https://www.finlex.fi/fi/laki/smur/2014/20141250>. [Vierailtu 25.5.2020.]
- Onarheim, K, Solantausta, Y. & Lehto, J. 2015. Process simulation development of fast pyrolysis of wood using aspen plus. *Energy & Fuels* 29 (1): 205–217. <https://doi.org/10.1021/ef502023y>. [Vierailtu 25.5.2020.]
- Paavola, T., Lehtoranta, S., Luostarinen, S. & Grönroos J. 2019a. Teknologia-aulukko. <https://www.agrisymbioosi.fi/teknologiat2>. [Vierailtu 8.4.2020.]
- Paavola, T., Lehtoranta, S., Luostarinen, S., Akujärvi, A. & Grönroos, J. 2019b. Agrisymbioosella kohti kestävämpää sianlihantuotantoa. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 50 /2019.
- Palva, R., Hellstedt, M., Luostarinen, M., Winqvist, E., Salo, T., Lehtoranta, S., Grönroos, J., Vuorenmaa, A., Hamina, H. & Puolamäki, K. 2018. Lisähyötyä siipikarjanlannasta. Keinoja lannankäytön tehostamiseen. Eura Print Oy.
- Peltola, I., Nurmisto, U., Kemppainen, E., Helminen, K. & Helminen, J. 1986. Pintaturpeen käyttö lypsylehmien kuivikkeena. *Työtehoseuran julkaisuja* 274: 1–151.
- Petersen, M. B., Knudsen, M. T., Hermansen, J. E. 2013. An approach to include soil carbon changes in life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production* 52: 217–224.
- Pingoud, K., Ekholm., T. & Savolainen, I. 2012. Global warming potential factors and warming payback time as climate indicators of forest biomass use. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 17(4): 369–386.
- Prins, M. J. 2005. Thermodynamic Analysis of Biomass Gasification and Torrefaction. Technische Universiteit Eindhoven, Alankomaat. Väitöskirja.
- Ravander, J., Mattila, T. J. & Rajala, J. 2019. Murokestävyys maan kasvukunnon mittarina. Helsingin yliopisto Ruralia-instituutti. Raportteja 191.
- Rekilä, R., Vertanen, P. & Rekilä, T. 2004. (Osioita päivitetty 2008 & 2010). Turkistilan ympäristökäsikirja. MTT ja Suomen Turkiseläinten Kasvattajain Liitto ry. ISBN: 951-729-923-0. 2-päivitetty painos 2008.
- Rekilä, T., Koskinen, N., Huhtanen, P., Pylkkö, P., Kupsala, K. & Ylivainio, K. 2009. Turkiseläintuotannon fosforikierron mallintaminen. Julkaisussa: Turtola, E. & Ylivainio, K. (toim.). Suomen kotieläintalouden fosforikierto- Säästöpotentiaali maataloilla ja aluetasolla. Maa- ja elintarviketalous 138.
- Riikonen, A. 2017. Biohiili ja sen käyttömahdollisuudet viherrakentamisessa. Esiselvitys. Metsätiet. Its, HY. http://intra.kaupunkitilaohje.hel.fi/?wpfb_dl=853. [Vierailtu 25.5.2020.]
- Rindbøl, C., Jørgensen, H., Johnsen, H., Gareis, C., Lystad, H., Tvedt, S., Eliasson, G., Cedervall, J. & Wilhelmsson-Göthe, A. 2007. Nordic organic waste project. Manual for Biowaste. Decision support tool for collection and treatment of source-sorted organic municipal solid waste. Manual version 1.01. December 3rd 2006.
- Ro, K. S., Cantrell, K. B. & Hunt, B. G. 2010. High-Temperature Pyrolysis of Blended Animal Manures for Producing Renewable Energy and Value-Added Biochar. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 49: 10125–10131.
- Roberts, K.G., Gloy, B.A., Joseph, S., Scott, N. R. & Lehmann, J. 2010. Life Cycle Assessment of Biochar Systems: Estimating the Energetic, Economic and Climate Change Potential. *Environmental Science & Technology* 44: 827–833.
- Sarvi, M., Rasi, S., Salo, T., Rasa, K., Vainio, M., Ylivainio, K. & Luostarinen, S. 2020. Pyrolyysi turkiseläinten lannan käsittelymenetelmänä. TURKISTEHO-hankkeen osaraportti. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 44/2020. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 35s.
- Sepponen, J. & Eskeli, P. 2012. Yksilöruokintalaitteiden hyödyntäminen turkiseläinten ravitsemustutkimuksissa. Hämeen Ammattikorkeakoulu. Kehitystyö/MTT. <https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/480867/Yksilöruokintalaitteiden%20hyödyntäminen%20turkiseläinten.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Vierailtu 25.5.2020.]
- SKTL (Suomen Turkiseläinten Kasvattajain Liitto). 2017. Tiedoksianto. Turkiseläinten eläinmäärien tilastot.
- Soimakallio, S. 2018. Ryhmäpäällikkö, Suomen ympäristökeskus, Helsinki. Suullinen tiedonanto 1.11.2018. [Sampo Soimakallion antama tieto hakkeen polton päästökertoimista.]
- Spets, J.-P. & Ahtila, P. 2004. Reduction of organic emissions by using a multistage drying system for wood-based biomasses. *Drying Technology* 22(3): 541–561.
- Strand, T. 2011. Biohiilen tekeminen jätemateriaalista maanparannuskäyttöön. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Kandidaatintyö. https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/76753/Kandidaatintyö_Strand.pdf?sequence=1. [Vierailtu 25.5.2020.]
- Tampio, E., Laakso, J., Winqvist, E. & Luostarinen, S. 2020. Turkiseläinten lannan käsittely biokaasulaitoksessa. [Luken Elina Tampion ym. kirjoittajien käsikirjoitus sarjaan Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus]

- Tontti, T. & Mäkelä-Kurtto, R. 1999. Biojätekompostit kasvintuotannossa. Kirjallisuuskatsaus. Maatalouden tutkimuskeskuksen julkaisuja. Sarja A 64. Jokioinen.
- Tripathi, M., Sahu, J. N. & Ganesan, P. 2015. Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 55: 467–481.
- Viita, T. 2013. Viljankuivauksen energiatehokkuuden selvittäminen simuloimalla. Maatalousteknologia. Maisterintutkielma. Helsingin yliopisto.
- VTT oy 2017. LIPASTO Yksikköpäästötietokanta. Päivitetty 7.7.2017. <http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/index.htm>. [Vierailtu 25.5.2020.]
- Vuorio, K. 2001. Pellostaa peltoon kompostoimalla. Uudenmaan ympäristökeskus- monisteita. Nro 97. Kestävä maatalous Vantaanjoella-projekti. ISBN 952-463-002-8 (nid.), ISBN 952-5237-85-0 (pdf).
- Wade, A. J., Durand, P., Beaujouan, V., Wessels, W., Raat, K., Whitehead, P. G., Butterfield, D., Rankinen, K. & Lepistö, A. 2002. A Nitrogen model for European catchments: New model structure and equations. *Hydrology and Earth System Science* 6: 559–582.
- Webb, J., Ryan, M., Anthony, S. G., Brewer, A., Laws, J., Aller, M. F. & Misselbrook, T. H. 2006. Cost-effective means of reducing ammonia emissions from UK agriculture using the NARSES model. *Atmospheric Environment* 40(37): 7222–7233.
- Weng, Z., Van Zwieten, L. Singh, B. P., Tavakkoli, E., Joseph, S., Macdonald, L. M., Rose, T. J., Rose, M. T., Kimber, S. W. L., Morris, S., Cozzolino, D., Araujo, J. R., Archanjo, B. S. & Cowie, A. 2017. Biochar built soil carbon over a decade by stabilizing rhizodeposits. *Nature Climate Change* 7: 371–376.
- Whitehead, P.G., Wilson, E. J. & Butterfield, D. 1998. A semi-distributed Integrated Nitrogen model for multiple source assessment in Catchments (INCA): Part I – model structure and process equations. *Science of the Total Environment* 210/211: 547–558.
- Wiesmeier, M., Urbanski, L., Hobbey, E., Lang, B., Von Lütow, M., Marin-Spiotta, E., Van Wesemael, B., Rabot, E., Ließ, M., Garcia-Franco, N., Wollschläger, U., Vogel, H.-J. & Kögel-Knabner, I. 2019. Soil organic carbon storage as a key function of soils- A review of drivers and indicators at various scales. *Geoderma* 333: 149–162.
- Wissmiller, D. 2009. Pyrolysis oil combustion characteristics and exhaust emissions in a swirl-stabilized flame. Iowa State University Capstones. Thesis and Dissertations.
- Ylivainio, K., Sarvi, M., Lemola, R., Uusitalo, R. & Turtola, E. 2014. Regional P stocks in soil and in animal manure compared to P requirement of plants in Finland: Baltic Forum for Innovative Technologies for Sustainable Manure Management. WP4 Standardisation of manure types with focus on phosphorous. MTT Report 124. <https://jukuri.luke.fi/handle/10024/481761>. [Vierailtu 25.5.2020.]
- YM (Ympäristöministeriö) 2018. Turkistarhauksen ympäristönsuojeluohje. Ympäristöhallinnon ohjeita 2/2018. ISBN: 978-952-11-4802-6.
- Ympäristönsuojelulaki 527/2014, annettu Naantalissa 27 päivänä kesäkuuta 2014. <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2014/20140527>. [Vierailtu 25.5.2020.]
- Zanzi, R. 2001. Pyrolysis of Biomass. Väitöskirja. Royal Institute of Technology, Department of Chemical Engineering and Technology, Chemical Technology, Tukholma, Ruotsi.



ISBN 978-952-11-5203-0 (PDF)

ISBN 978-952-11-5202-3 (nid.)

ISSN 1796-1726 (verkkoj.)

ISSN 1796-1718 (pain.)